EL CEREBRO Y EL LENGUAJE DE LOS SIGNOS • INTERFERON • LOS HIMBA

# INVESTIGACION y CIENCIA

AGOSTO 2001
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

# LA PARADOJA DE LA CORONA SOLAR

LA HISTORIA DE LA CIENCIA DURANTE LOS ULTIMOS 25 AÑOS

CRECIMIENTO Y CAIDA DEL PELO

RUMBO A MARTE

EL VUELO DE LOS INSECTOS







Agosto de 2001 Número 299

## SECCIONES

SCIENTIFIC AMERICAN



# SECCIONES



**Portada:** Centro de Vuelos Espaciales Goddard/NASA

## PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

| Página | Fuente |
|---|---|
| 4-7 | Timothy Archibald |
| 8-9 | Bryan Christie |
| 10-11 | Timothy Archibald |
| 14-15 | Centro de Vuelos Espaciales Goddard, NASA |
| 16 | TRACE/NASA |
| 17 | Instituto de Ciencias del Espacio y Astronáutica, Japón; Laboratorio Solar y de Astrofísica Lockheed-Martin; Observatorio Nacional Astronómico de Japón; Universidad de Tokio; NASA |
| 18 | Don Dixon |
| 20 | Laurie Grace |
| 21 | Jean Mouette y Serge Koutchmy, ©Instituto de Astrofísica de París |
| 22-29 | Peter Stemler |
| 44-50 | Jesús Gil y Mariano Esteban |
| 52-53 | Andy Peterson |
| 54 | Robert Zubrin |
| 55 | Andy Peterson |
| 57 | Jeff Mermelstein |
| 58-59 | Joe Zeff |
| 60 | Jeff Mermelstein |
| 61 | Joe Zeff; fuente: O'Tar T. Norwood |
| 62 | Jeff Mermelstein |
| 64-67 | Karin Retief |
| 68 | Susan Carlson (*mapa*); Karin Retief (*fotografías*) |
| 70-73 | Karin Retief |
| 77 | Instituto Nacional de Técnicas Aeronáuticas (*arriba*); Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (*abajo*) |
| 78 | Cortesía de Carlos Ferrater Lambarri. Jardín Botánico de Barcelona |
| 79 | M. Alcaraz, Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona |
| 80 | Universidad Politécnica de Valencia (*arriba*); Instituto de Biología Molecular de Barcelona (*abajo*) |
| 81 | Observatorio Astronómico de Mallorca (*arriba*); Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma (*abajo*) |
| 82-83 | Bruno Vacaro |
| 84-86 | Juan M.R. Parrondo |
| 87 | John McFaul |
| 88-89 | George Retseck |

## COLABORADORES DE ESTE NUMERO

**Asesoramiento y traducción:**

J. Vilardell: *El vuelo de los insectos, Hace..., Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; M.ª Rosa Zapatero: *La paradoja de la corona solar*; Luis Bou: *El lenguaje de los signos en el cerebro* y *Aventuras matemáticas*; Juan Pedro Campos: *Ensayo para Marte* y *Fullerenos (Ciencia y sociedad)*; José Manuel García de la Mora: *Los himba y la presa hidroeléctrica*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; José M.ª Valderas Martínez: *Nexos*


## INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

## SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORIAL DIRECTOR, ON-LINE Kristin Leutwyler
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky, George Musser y Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

## SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

**Precios de suscripción:**

| | Un año | Dos años |
|---|---|---|
| España | 8.800 pta. | 16.000 pta. |
| | 52,89 euro | 96,16 euro |
| Extranjero | 11.500 pta. | 21.500 pta. |
| | 69,12 euro | 129,22 euro |

**Ejemplares sueltos:**

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

## DISTRIBUCION

**para España:**

**LOGISTA, S. A.**
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

**para los restantes países:**

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

**PUBLICIDAD**

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada





ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

# Hace...

## ...cincuenta años

**El transistor**. «Desde estas etapas iniciales del desarrollo de los transistores parece ya seguro que sustituirán a las válvulas de vacío en casi cualquier aplicación. ¿Qué resultados cabe esperar de esta gran revolución en las técnicas y posibilidades de la electrónica? Puesto que la revolución no ha hecho más que empezar, sólo podemos especular. Una parte sustantiva de las mejoras en las características funcionales del aparato se debe a la aparición de un nuevo dispositivo llamado 'transistor de uniones'. Las unidades primitivas consistían en un cristal de germanio en contacto con dos conductores muy finos, los 'bigotes de gato'. En el transistor de uniones esos contactos puntuales han sido sustituidos por contactos de más superficie. Por tanto funciona con mayor rendimiento y consume mucha menos potencia. —Louis N. Ridenour.»

**Ojo y cerebro.** «Adelbert Ames ha ideado algunos procedimientos nuevos para estudiar la percepción visual. Su teoría sugiere que el mundo que cada uno de nosotros conoce es un mundo creado en gran medida por nuestra experiencia con el entorno. En la ilustración, las figuras aparecen desvirtuadas cuando se colocan en una sala especial. La mujer de la izquierda parece mucho menor porque la mente 'apuesta' a que las superficies opuestas de la sala son paralelas.»

**La expansión del universo.** «El telescopio Hale de 508 cm de Monte Palomar, en California, ha dado una respuesta provisional a una de las muchas preguntas para las que fue construido: ¿Sigue el universo expandiéndose a velocidad creciente más allá de los límites de visibilidad de los telescopios anteriores? La respuesta parece ser positiva. A una distancia de 360 millones de años luz, límite hasta ahora de la penetración de los 508 cm, las nebulosas aparentemente se alejan de la Tierra a una velocidad de más de 60.000 kilómetros por segundo, cifra predicha por la teoría de la expansión del universo.»



*Percepción errónea a causa de una perspectiva desvirtuada, 1951*

## ...cien años

**Quemaduras por radiación.** «Merced a una desagradable experiencia, Henri Becquerel ha confirmado el hecho, ya apuntado por Walkoff y Giesel, de que los rayos del radio ejercen una acción energética sobre la piel. Tras portar durante unas seis horas, en el bolsillo de su chaleco, un pequeño tubo sellado con unos pocos decigramos de cloruro de bario, sustancia intensamente radiactiva, se le apreció, diez días más tarde, en la piel una marca roja correspondiente al tubo; la piel se desprendió dejando una llaga supurante, que tardó un mes en sanar. Pierre Curie sufrió la misma experiencia tras exponer un brazo durante más tiempo a una muestra menos activa.»

**La Antártida.** «El año presente será memorable en los anales de la Exploración Antártica, puesto que concertadamente se llevarán a cabo esfuerzos decididos por la Sociedad Geográfica Británica y el gobierno alemán encaminados a desentrañar algo de la *terra incognita*. La embarcación en la que se hará a la mar la expedición británica, *HMS Discovery,* fue recientemente botada en Dundee (Escocia). El jefe de la expedición, que durará tres años, es el capitán R. F. Scott, de la Real Reserva Naval.» [*Nota de la redacción: Se trata de la primera expedición a la Antártida de Robert Falcon Scott.*]

## ...ciento cincuenta años

**Piedras en la mente.** «Míster George Gibbs, de Newport (Rhode Island), fundador de la magnífica vitrina de minerales del Colegio Yale, estaba en cierta ocasión buscando minerales en el norte de Vermont con la ayuda de tres o cuatro obreros. Un día llegó en carruaje a la taberna donde se hospedaba un amigo suyo, se dieron la mano y se saludaron amablemente. Al observar tal cosa, el patrono se llevó aparte al forastero e informó a éste de que su amigo estaba demente: había empleado hombres durante casi un mes moliendo piedras en pequeños trozos, por lo que si guardaba alguna amistad con aquel caballero, desde luego debería informar a su familia acerca de su estado.»



**1. UN PROTOTIPO DE INSECTO ROBOTICO VOLADOR** se está desarrollando en el Centro de Mecatrónica Inteligente de la Escuela de Ingeniería de Vanderbilt. Estos ingenios se basan en una aerodinámica más afín a la de los insectos que a la de los aviones.

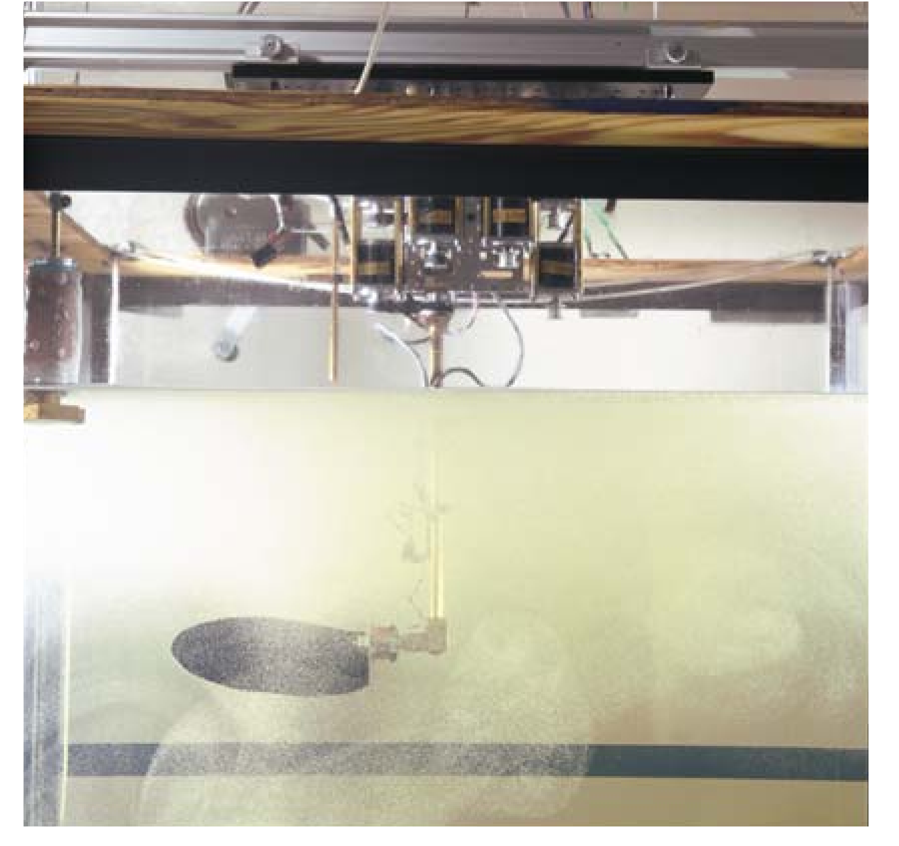
# El vuelo de los insectos

## Los insectos, los primeros animales que desarrollaron el vuelo activo, se mantienen en el aire merced a una combinación de efectos aerodinámicos

Michael Dickinson

En un tanque de dos toneladas de aceite mineral, un par de alas mecánicas baten sin cesar, empleando unos pausados cinco segundos en ejecutar cada ciclo. Accionadas por seis motores controlados por ordenador, las alas crean en el fluido un movimiento de remolino. Con los millones de burbujas formadas, el tanque parece una gigantesca jarra de cerveza en cuyo seno se agita una mosca mecánica de 60 centímetros de envergadura alar. La escena está iluminada por láminas destellantes de luz láser verde, mientras videocámaras especiales graban las trayectorias de las brillantes y revueltas burbujas. En las alas, unos sensores registran las fuerzas que sobre ellas ejerce el fluido en cada instante.

Nuestro grupo de investigación construyó tan extraña instrumentación en un empeño por explicar la física de uno de los sucesos más corrientes: el vuelo estacionario de una mosca de la fruta. El insecto nada sabe acerca de la aerodinámica de la generación de vórtices, retardo en la pérdida de sustentación, circulación rotacional y captura de estela; se limita a emplear las consecuencias prácticas de todo ello 200 veces por segundo batiendo sus alas. Nuestro simulacro mecánico del insecto, apodado Robomosca, imita el aleteo del invertebrado, pero a una velocidad mil veces menor y a una escala cien veces mayor. Amedrentados por la rapidez y la pequeñez del sujeto real, depositamos nuestras esperanzas en Robomosca para entender la intrincada aerodinámica que permite a los insectos hacer eso que hacen rutinariamente: volar.



**2. ROBOMOSCA ALETEANDO LENTAMENTE en aceite mineral viscoso. Simula la aerodinámica del aleteo rápido en el aire de una mosca de la fruta. Haces de láser iluminan las burbujas de aire que se forman en el seno del aceite, con el fin de revelar los intrincados flujos que se producen, mientras que sensores instalados en las alas registran las fuerzas que se generan.**

Si atendemos al número absoluto de especies, impacto ecológico o biomasa total, reconoceremos que los insectos son los animales predominantes en nuestro planeta. Aunque son múltiples los factores que contribuyen a su éxito extraordinario, en la lista ocupa la capacidad de vuelo uno de los primeros lugares. El vuelo les permite alejarse de su sitio de nacimiento, trasladarse a puntos remotos en busca de alimento y emigrar a climas más cálidos con el cambio de estaciones. Pero el vuelo no es para ellos una mera forma de traslado. Muchos recurren a la acrobacia aérea para depredar, defender el territorio o encontrar socio sexual. La selección operada en pro de comportamientos de vuelo cada vez más elaborados y eficientes ha llevado al límite la constitución de tales organismos. Entre los insectos hallamos los olfatos más sensibles, los sistemas visuales más agudos y los músculos más potentes, especializaciones todas ellas ligadas de un modo u otro al comportamiento en vuelo.

## El autor

MICHAEL DICKINSON, profesor del departamento de biología en la Universidad de California en Berkeley, dio sus primeros pasos en el campo de la neurología estudiando las bases celulares de la conducta. Su interés por el vuelo se le despertó al socaire de un trabajo sobre las diminutas estructuras sensoriales que perciben la flexión de un ala batiente. Ahora aborda el comportamiento de un modo integral, en el que convergen el análisis biológico, los principios de la física y las posibilidades de la ingeniería.

Por segundo, el vuelo consume 10 veces más energía que la locomoción en tierra. Siguiendo con la inversión energética, el vuelo es, por kilómetro recorrido, cuatro veces más económico que la locomoción en tierra. Cuesta mucho llegar a volar, pero el vuelo es muy valioso para los organismos que gozan de tal capacidad.

Hasta hace poco una molesta laguna se interponía en nuestros conocimientos acerca del vuelo de los insectos: carecíamos de una explicación aerodinámica satisfactoria. Dificultad que se convirtió incluso en leyenda, divulgada como el caso del "científico que demostró que los abejorros no pueden volar". La historia del abejorro se remonta al libro escrito en 1934 por el entomólogo Antoine Magnan, quien se remite a los cálculos de su ayudante, el ingeniero André Sainte-Laguë. La conclusión se fundaba en el hecho de que la sustentación máxima posible producida por alas de un avión del tamaño de las alas de un abejorro y volando a la velocidad de una abeja sería mucho menor que el peso de una abeja.

En los decenios subsiguientes, ingenieros y matemáticos fueron acumulando un cuerpo de conocimientos aerodinámicos suficientes para proyectar y construir aviones comerciales Boeing 747 y cazas furtivos. Pero por refinados que tales aviones sean, su diseño y funcionamiento se basan en principios estacionarios: el flujo del aire alrededor de las alas y las fuerzas generadas por ese flujo son estables, no varían, a lo largo del tiempo. La dificultad en el caso de los insectos radica en que baten y rotan las alas de 20 a 600 veces por segundo. El consiguiente patrón de flujo de aire crea fuerzas aerodinámicas que varían continuamente y que confunden los análisis, matemáticos y experimentales.

Además de resolver un viejo rompecabezas científico, el saber por qué pueden volar los insectos podría tener aplicaciones prácticas. Los ingenieros han comenzado a explorar la posibilidad de desarrollar robots voladores del tamaño de un pulgar para aplicaciones de búsqueda y salvamento, control ambiental, vigilancia, detección de minas y exploración planetaria.

Aunque el hombre ha conseguido construir modelos de avión del tamaño de un gorrión, nadie ha construido un avión del tamaño de una mosca capaz de volar. En escalas tan exiguas, la viscosidad del aire cobra mayor importancia y atenúa el flujo de aire que mantiene en vuelo a los aviones grandes. Los insectos baten las alas no sólo porque nunca desarrollaron ruedas, engranajes y turbinas, sino porque sus dimensiones liliputienses re-

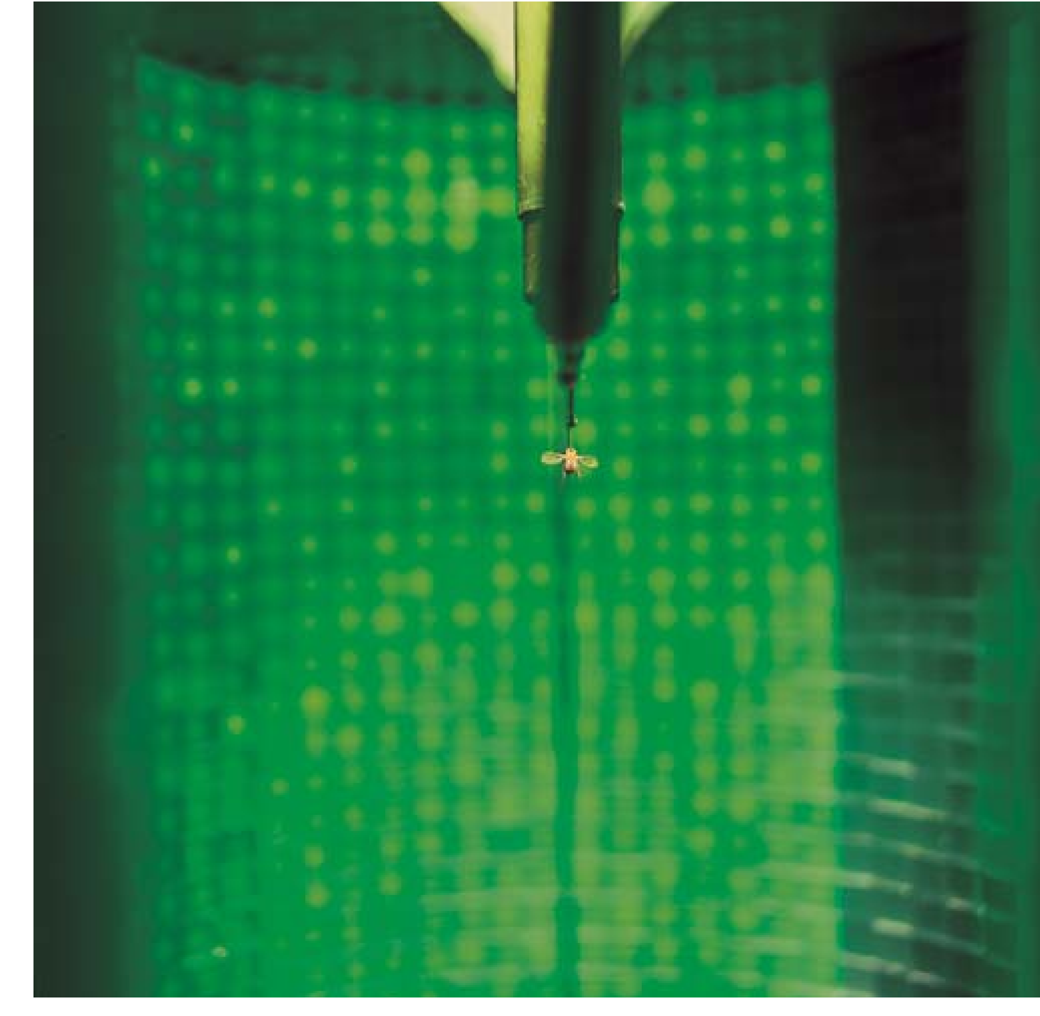
quieren el uso de unos mecanismos aerodinámicos diferentes. Los insectos robóticos del futuro podrían deber su agilidad aerodinámica a sus análogos naturales.

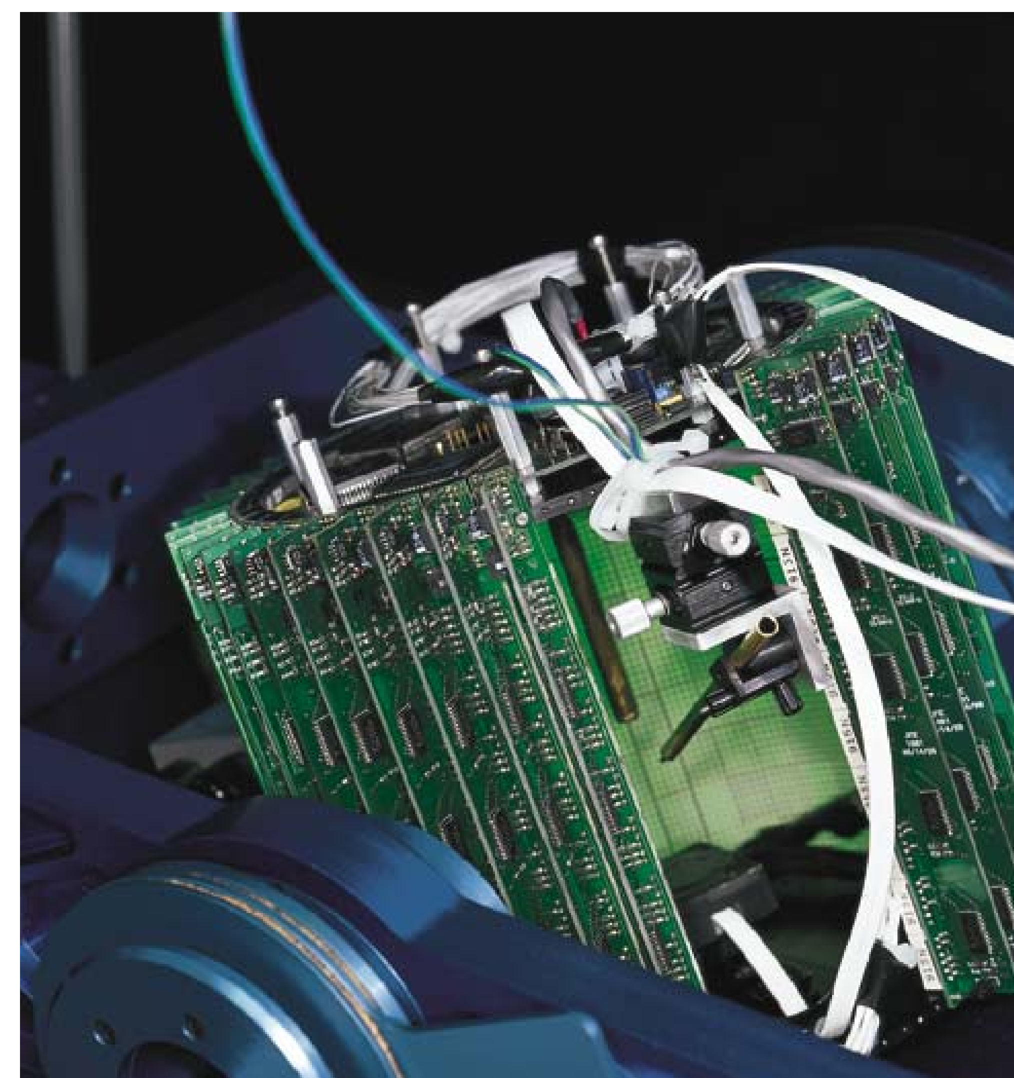
## Revuelo de alas

Para un observador ocasional es evidente que un insecto no vuela igual que un avión. Mucho menos obvia resulta la complejidad del aleteo. Las alas de los insectos no se limitan a oscilar arriba y abajo cual paletas montadas sobre unas simples bisagras. Antes bien, la punta de cada ala describe un óvalo estrecho muy inclinado. Además, en cada batir las alas cambian de orientación: la cara superior mira hacia arriba durante la carrera descendente, pero luego el ala gira en torno a su eje de modo que la cara inferior mira hacia arriba durante la carrera ascendente.

Los primeros análisis del vuelo de los insectos trataron de aplicar a tan complejos movimientos la aerodinámica estacionaria clásica, el planteo adecuado para las alas de avión. Tales intentos no son tan ingenuos como el mal reputado cálculo del abejorro, puesto que tienen en cuenta la variación de velocidad de las alas al batir el aire. Imaginemos que se inmoviliza el ala del insecto en una posición de su carrera, o ciclo de movimiento alar, y que entonces se prueba en un túnel de viento, con una velocidad de viento y una orientación del ala que imiten el movimiento exacto del ala a través del viento en ese instante. Podríamos así medir la fuerza aerodinámica actuante sobre el ala en cada momento.

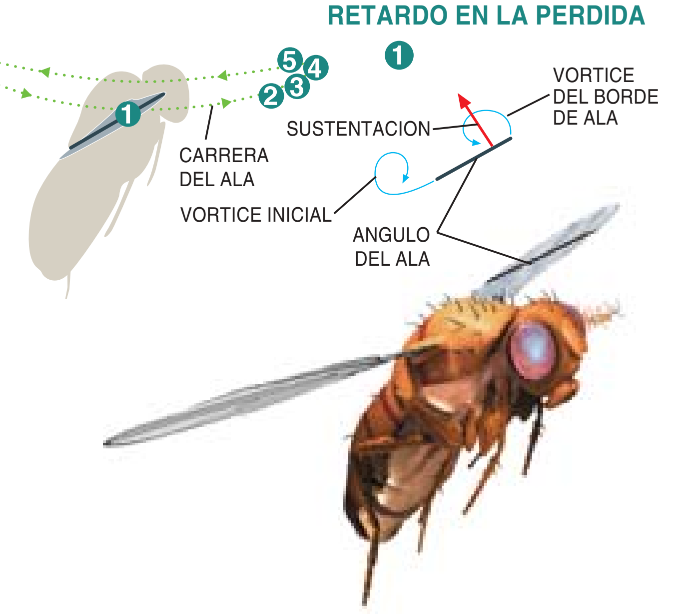
Si esa teoría estacionaria bastase, la fuerza media, calculada su-

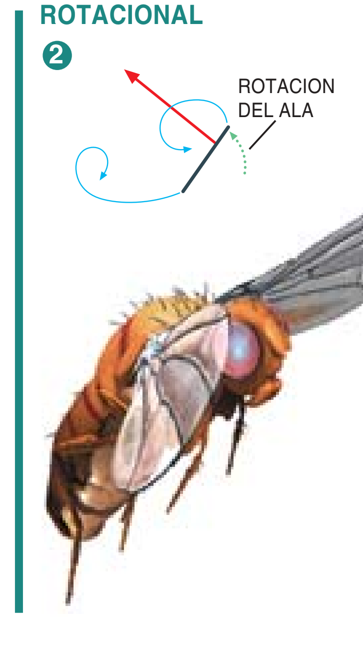


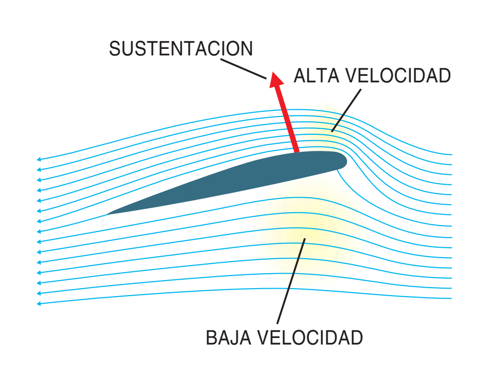


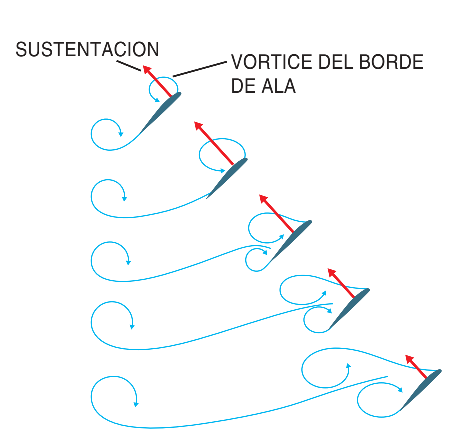
**3. MOSCA INSTRUMENTADA vista contra el fondo de una arena de realidad virtual (*arriba*). Un ordenador controla los miles de diodos verdes para producir la ilusión (a la mosca) de objetos que se mueven de acuerdo con las maniobras aerodinámicas del animal. Similar arena montada sobre un cardán (*abajo*) simula los virajes, balanceos y guiñadas de un vuelo libre.**

**4. LA MOSCA DE LA FRUTA EMPLEA** tres mecanismos aerodinámicos diferentes para mantener su peso en el aire. Durante gran parte de la carrera del ala (*1*), se forma un vórtice de borde de ataque que aumenta la sustentación, proceso llamado retardo en la pérdida de sustentación porque el vórtice no tiene tiempo para desprenderse, que es lo que ocurre cuando un avión entra en pérdida de sustentación. Al final de cada carrera (*2, 3, 4*), el ala rota, lo que genera una sustentación rotacional similar a la de una pelota de tenis golpeada con contragiro. Al iniciarse la carrera ascendente (*5*), el ala atraviesa la estela de la carrera descendente. Entonces el ala está orientada de modo que ese flujo de aire adicional añada más sustentación, proceso llamado captura de estela.



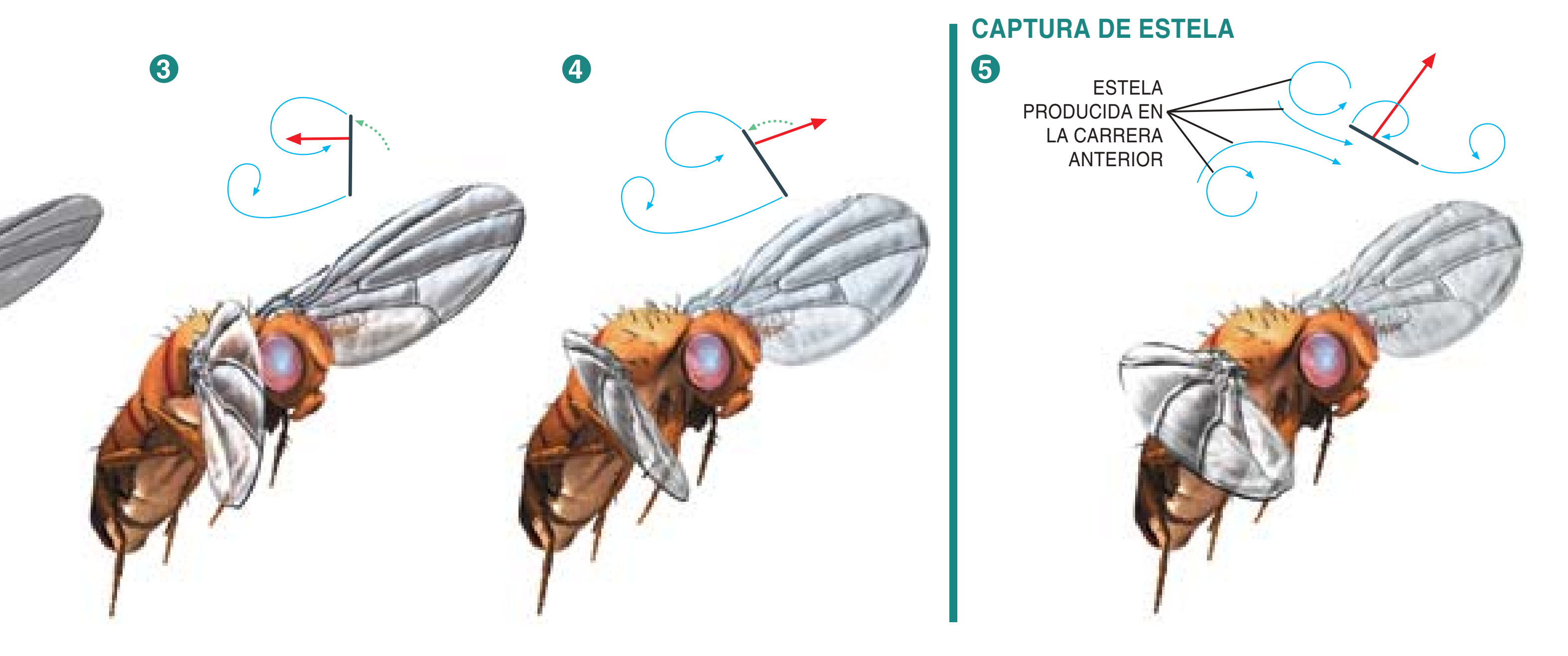

**5. EN UN ALA DE AVION** la sustentación se genera por aerodinámica de flujo estacionario (*arriba*). El flujo no turbulento de la cara superior del ala es más rápido que bajo el ala, generándose una zona de baja presión y una fuerza ascendente. Si el ángulo de ataque es demasiado alto (*abajo*), el ala entra en pérdida. Cuando ésta se inicia, se forma un vórtice en el borde de ataque con una gran velocidad de flujo, lo que aumenta momentáneamente la sustentación. Pero el vórtice se desprende en seguida del ala, con drástica reducción de la sustentación.

mando las fuerzas para todas las posiciones diferentes del ala a través del ciclo, apuntaría hacia arriba y sería igual al peso del insecto. A comienzos de los años setenta los expertos discrepaban todavía sobre si tal análisis podía explicar de qué modo los insectos se mantienen en el aire. Un decenio después, Charles Ellington, de la Universidad de Cambridge, revisó cuidadosamente todos los datos disponibles y concluyó que el enfoque estacionario no podía responder de las fuerzas necesarias. La búsqueda de unos mecanismos dinámicos "de flujo no estacionario", capaces de explicar las mejores características funcionales de las alas batientes, despegó con un vigor renovado.

La distribución de velocidades y presiones dentro de un fluido está regida por las ecuaciones de Navier-Stokes, formuladas a principios del siglo XIX. (A los efectos de los análisis aerodinámicos, el aire no es más que un fluido de muy baja densidad.) Si pudiéramos resolver esas ecuaciones para un ala batiente de insecto, podríamos describir la aerodinámica entera de su vuelo. Por desgracia, la complejidad del movimiento de las alas hace de éste un problema de simulación que desborda incluso a los ordenadores más potentes.

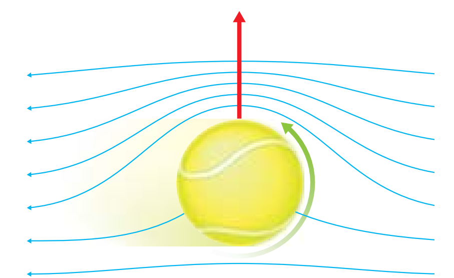
Si no podemos resolver el problema mediante teoría y cálculo puros, ¿podremos acaso medir directamente las fuerzas generadas por un ala batiente de insecto? Varios grupos han hecho esfuerzos muy valiosos y están desarrollando nuevos e imaginativos enfoques, pero el sutil tamaño y la gran velocidad de las alas dificultan la medición de fuerzas.

Para salvar esas limitaciones, los biólogos que estudian la locomoción animal acostumbran recurrir a modelos en escala, el mismo truco que usan los ingenieros para proyectar aviones, barcos y automóviles. Los ingenieros reducen a escala el tamaño y la velocidad de los vehículos, mientras que los investigadores del vuelo de los insectos aumentan el tamaño de éstas y disminuyen su velocidad hasta valores más manejables. Tales modelos rinden unos resultados aerodinámicos significativos, siempre que cumplan una condición crucial respecto a las dos fuerzas a las que un objeto se encuentra sometido en el seno de un fluido: una fuerza de presión, producida por la inercia del fluido, y una fuerza cortante, o tangen-




cial, causada por la viscosidad del fluido.

La fuerza inercial es esencialmente la necesaria para empujar una masa de fluido; es mayor cuanto más denso es el fluido. La viscosidad se parece más al rozamiento; se produce cuando regiones contiguas de un fluido se mueven a velocidades diferentes, y es la que hace tan trabajoso agitar melazas. La física subyacente al animal real y a su modelo es la misma mientras las fuerzas inercial y viscosa tengan la misma relación, llamada número de Reynolds. Esta magnitud adimensional aumenta con la velocidad de un objeto, con su longitud y con la densidad del fluido; pero es inversamente proporcional a la viscosidad del medio. Al ser grandes y rápidos, los aviones funcionan con números de Reynolds de entre un millón y 100 millones. Al ser pequeños y lentos, los insectos funcionan con números de Reynolds de entre 100 y 1000, y de menos de 100 para los insectos más pequeños, tales como los tisanópteros, tan nocivos para las plantas.



**6. EL FLUJO DEL AIRE alrededor de una pelota de tenis golpeada con contragiro genera una suspensión rotacional. Los insectos aprovechan el mismo fenómeno rotando sus alas al final de cada carrera.**

## El retardo en la pérdida de sustentación

Con el propósito de entender el mecanismo en cuya virtud una mosca de la fruta genera una fuerza aerodinámica, en 1992 Karl Götz y el autor, a la sazón ambos en el Instituto Max Planck de Cibernética Biológica de Tubinga, construyeron un modelo de ala que consistía en una paleta de 5 × 20 cm conectada a una serie de motores que la movían en el interior de un gran tanque de almíbar espeso. Aquella combinación de mayores tamaño y viscosidad, y aletazos más lentos, daba el mismo número de Reynolds y, por tanto, la misma física que un ala de mosca de la fruta batiendo el aire.

Nuestro equipo dotó al ala con un sensor de fuerza para medir la sustentación y la resistencia al avance generadas al moverse en el seno del pegajoso líquido. Pusimos cantoneras o deflectores en los extremos de las alas para inhibir el flujo a lo largo de la longitud y del borde del ala. De esta técnica acostumbran servirse los modelos aerodinámicos sencillos, que, aunque simplifica el análisis al reducir el flujo de tres a dos dimensiones, comporta el riesgo de omitir efectos importantes.

Nuestros experimentos con este modelo de ala y los trabajos de otros laboratorios nos ayudaron a descubrir una posible solución al enigma del vuelo de los insectos: el retardo en la pérdida de sustentación. En un avión, hay pérdida de sustentación (se dice que entra en pérdida) si el ángulo bajo el que el ala corta al viento, el ángulo de ataque, es demasiado empinado. Para ángulos de ataque poco inclinados, el aire se divide en dos en el frente del ala y fluye suavemente en sendas corrientes por las superficies superior e inferior. El flujo superior es más rápido, con lo que la presión sobre la cara superior del ala es menor y se produce un efecto de succión ascendente sobre el ala, generándose así la fuerza de sustentación. Pero si el ángulo de ataque es demasiado empinado, el flujo superior no puede seguir el contorno del ala y se separa de ésta, con el resultado de una catastrófica pérdida de sustentación.

¿Cómo puede ser que la pérdida de sustentación, desastrosa para un avión, contribuya a la sustentación de un insecto? La respuesta reside en la velocidad del



**7. MOSCARDA INSTRUMENTADA para estudiar la relación de la actividad eléctrica en los músculos de dirección con los cambios en los movimientos de las alas que tienen lugar durante las maniobras de dirección.**

aleteo. Las alas no pierden la sustentación instantáneamente; tras aumentar el ángulo de ataque, el flujo generador de la sustentación tarda un tiempo en desbaratarse. De hecho, en una fase inicial del fenómeno la sustentación aumenta brevemente en virtud del vórtice del borde de ataque, una estructura de flujo transitoria. Un vórtice es un flujo circular o espiral, como el que se presenta en los tornados o en el remolino en el desagüe de una bañera que se vacía.

El vórtice del borde de ataque se forma justo encima y detrás del borde de ataque del ala, a modo de remolino cilíndrico largo, puesto de canto. En el vórtice el flujo del aire es muy rápido y su consiguiente baja presión produce una sustentación adicional importante. Este efecto fue reconocido por ingenieros aeronáuticos ingleses a comienzos de los años treinta, pero resulta demasiado breve en su duración para aprovecharlo en la mayoría de las aeronaves. Con gran rapidez, el vórtice se separa del ala y es despedido hacia la estela del avión, disminuyendo en picado la sustentación, con la caída consiguiente del aparato. Los aletazos de los insectos son tan breves, que el ala gira y cambia de sentido, produciendo un nuevo vórtice de sentido contrario, inmediatamente después de haber sido despedido el anterior.

Estos resultados, obtenidos con modelos bidimensionales simples, Ellington y su grupo de Cambridge los extendieron a tres dimensiones. Era a mediados de los años noventa. Estudiaron el vuelo de la gran *Manduca sexta*, o esfinge, instrumentada en un túnel de viento, así como el de una mariposa nocturna robótica tridimensional. Las líneas de humo revelaron la presencia de un vórtice pegado a los bordes de ataque de las alas durante las carreras descendentes. Sugirió el equipo de Ellington que había, además, un flujo axial desde la base hasta la punta de las alas que intensificaba el efecto reduciendo la fuerza del vórtice pero aumentando su estabilidad y permitiendo que siguiera unido a las alas durante toda la carrera. Ese flujo axial podría adquirir una importancia particular en insectos grandes, tales como esfinges y libélulas que agitan sus alas con carreras más largas.

Aunque la identificación de ese efecto resolvió una buena porción del misterio, algunas series de hechos sugerían que los insectos hacen uso de otros mecanismos, además del retardo en la pérdida. Primero, la fuerza adicional producida por el retardo en la pérdida basta para explicar cómo un insecto se mantiene en el aire, pero no basta para explicar por qué numerosos insectos pueden izar casi dos veces su propio peso. Segundo, algunos investigadores han intentado medir las fuerzas que crea un insecto instrumentándolo con un transductor sensible a las fuerzas. Tales experimentos hay que contemplarlos con cautela, ya que un animal instrumentado puede que no se comporte igual que otro en vuelo libre; sin embargo, la exacta sincronización de las fuerzas no explica fácilmente el retardo en la pérdida. Así, cuando Götz empleó una técnica de difracción de láser para medir las fuerzas generadas por una mosca de la fruta, descubrió que las fuerzas más intensas se daban durante la carrera ascendente, en un momento en que cabría esperar que las fuerzas resultantes del retardo fueran febles.

Buscando nuevos mecanismos no estacionarios, en 1998 Fritz-Olaf Lehman, Sanjay P. Sane y el autor construyeron un modelo de gran tamaño de una mosca de la fruta, *Drosophila melanogaster*, la Robomosca mencionada. El aceite mineral viscoso del tanque hace que el aleteo, una vez cada cinco segundos, de las alas robóticas de 25 centímetros sea dinámicamente semejante a los 200 aleteos por segundo de las alas de 2,5 milímetros de una mosca de la fruta en el aire. Gracias a nuestra reconstrucción artificial medimos dos características críticas: las fuerzas aerodinámicas sobre las alas y el flujo presente a su alrededor, ambas magnitudes casi imposibles de determinar en la mosca real. Además, si bien Robomosca se proyectó para imitar a una mosca de la fruta, programando los seis motores que accionan ambas alas, podemos recrear el movimiento de las alas de numerosas especies de insectos. Podemos también hacer que Robomosca aletee de cualquier modo requerido para comprobar hi-



**8. PROTOTIPO MICROMECANICO de un insecto volador en desarrollo por el Laboratorio de Robótica y Mecánica Inteligente de la Universidad de California en Berkeley. Los parámetros del diseño se basan en la mosca *Calliphora*.**

pótesis específicas, lujo que no proporcionan los animales reales, que tienden a mostrarse inestables bajo condiciones de laboratorio.

## Resultados experimentales

Cuando Robomosca aleteaba como una mosca de la fruta, medíamos un curioso patrón de fuerzas. Al comienzo y al final de cada ciclo o carrera, las alas generaban unas fuerzas intensas transitorias, que no podían atribuirse sin más al retardo en la entrada en pérdida. Esos picos de fuerza se presentaban durante las inversiones de la carrera, cuando el ala se refrena y rota rápidamente, sugiriendo que la causa podría estar en la misma rotación.

Un objeto que se mueve por el aire produce unos flujos similares a los que sustentan a un ala normal. Una pelota de tenis golpeada con contragiro impulsa al aire más rápidamente por arriba, haciendo que la pelota se eleve. Al revés, los sobregiros impulsan al aire más deprisa por debajo, impulsando la pelota hacia abajo. Aunque un ala plana no es una bola, su rotación produce cierta sustentación en razón del mismo mecanismo general.

Comprobamos nuestra hipótesis modificando el momento exacto del ciclo de la carrera en que el ala voltea. Si un ala rota al final de un ciclo, como en una carrera de vuelo normal, su borde de ataque rota hacia atrás con relación al sentido en que se está moviendo el ala; ésta debe desarrollar una cierta fuerza ascendente, como en una pelota de tenis golpeada con contragiro. Si el ala gira con retraso, al inicio de la carrera siguiente, el borde de ataque se desplaza hacia adelante con relación al sentido del movimiento, y el ala desarrollará una fuerza descendente, como en una pelota de tenis con sobregiro. Los datos de Robomosca concordaron completamente con esas previsiones. Revelaban que las alas batientes desarrollan una sustentación importante merced a la circulación rotacional.

Quedaba, no obstante, otro importante pico de fuerza en los datos de Robomosca, que se presentaba al comienzo de cada carrera ascendente y descendente; la circulación rotacional no podía explicarlo fácilmente. A través de varias series de experimentos se fue mostrando que el pico en cuestión se debía a un fenómeno de captura de estela, determinado por la colisión del ala con la estela vorticial (turbulencia) de la carrera anterior.

Cada carrera del ala deja tras de sí una complicada estela consistente en la vorticidad que produjo al trasladarse y rotar en el seno del fluido. Cuando el ala invierte el sentido de su movimiento, atraviesa ese aire revuelto. Una estela contiene una energía que el insecto ha cedido al fluido, de modo que la captura de la estela brinda al invertebrado un modo de recuperar parte de esa energía; para reciclarla, por así decirlo. Sometimos a prueba la hipótesis de la captura de estela deteniendo por completo las alas de Robomosca tras batir adelante y atrás. Las alas estacionarias continuaron generando una fuerza porque el fluido que las rodeaba seguía moviéndose.

Aunque la captura de estela debe siempre ocurrir al comienzo de cada carrera, lo mismo que en la circulación rotacional la mosca puede manipular la intensidad y el sentido de la fuerza generada cambiando la sincronización de la rotación del ala. Si ésta rota antes, ya dispone de un ángulo de ataque favorable cuando colisiona con la estela y se genera una intensa fuerza ascendente. Si el aleteo se retrasa, la colisión con la estela genera una fuerza descendente.

La combinación de captura de estela y circulación rotacional facilita además la explicación de la aerodinámica del control del vuelo; o sea, cómo se guían las moscas. Se observa que éstas ajustan la sincronización de la rotación de las alas cuando viran. En algunas maniobras, el ala externa del viraje rota antes, generando más sustentación, y el ala interna del viraje rota después, generando menos sustentación; entonces, la fuerza neta inclina y orienta al animal en la dirección deseada. La mosca dispone de un sistema de refinados sensores —los ojos, unas minúsculas alas traseras que usa como giróscopos y una batería de estructuras mecanosensoriales en las alas— que puede emplear para afinar con precisión la sincronización rotacional, la amplitud de la carrera y otros aspectos del movimiento alar.

## Una compañera para Robomosca

Los trabajos de numerosos investigadores están empezando a cristalizar en una teoría coherente del vuelo de los insectos, pero hay muchas cuestiones pendientes. Los insectos presentan una vasta variedad de formas corporales, tamaños y conductas, desde los diminutos tisanópteros hasta los grandes esfíngidos, desde dípteros hasta los crisópidos cuyos dos pares de alas baten levemente fuera de sincronía y los cicindélidos con dos grandes alas inmóviles (los élitros, que forman su caparazón al posarse), además de las dos alas que usan para volar. ¿Hasta que punto son aplicables a esa miríada de casos los resultados de la mosca de la fruta?

Hasta ahora los estudios se han centrado en el vuelo estacionario, que es el caso de explicación más difícil, pues el insecto no aprovecha la corriente de aire. Pero, ¿emplean los insectos otros mecanismos importantes para sustentarse cuando se desplazan? Muchos investigadores se están preparando para estudiar tan estimulantes temas. Mi grupo está construyendo la "compañera de Robomosca", que vivirá en un tanque lo bastante grande para que vuele hacia adelante y vire, y así comprobar, por ejemplo, nuestras hipótesis acerca de cómo ejecutan las moscas los cerrados virajes que las caracterizan ajustando la sincronización de las carreras de sus alas. Tras poner de manifiesto el conjunto de trucos básicos que usan los insectos para permanecer en el aire, empieza de veras la fiesta.

## Bibliografía complementaria

EL MUNDO DE LOS INSECTOS. Temas de Investigación y Ciencia, n.º 2. Barcelona, 1995.

THE BIOMECHANICS OF INSECT FLIGHT: FORM, FUNCTION, EVOLUTION. Robert Dudley. Princeton University Press, 2000.

**Desde hace tiempo los astrónomos andaban desconcertados ante un fenómeno extraño: las tórridas capas más exteriores del Sol reposan sobre una superficie templada. El misterio empieza a resolverse**

# La paradoja de la corona solar

Bhola N. Dwivedi y Kenneth J. H. Phillips

**1. SUSPENDIDA EN EL MEDIO,** una fulguración (*corriente mechada a la derecha*) ha salido de la superficie del Sol hacia su atmósfera: la corona. El plasma coronal es invisible en esta imagen, que muestra la luz ultravioleta del gas frío de la fulguración y de la cromosfera subyacente. Las regiones blancas son de alta densidad; las rojas, de baja densidad.

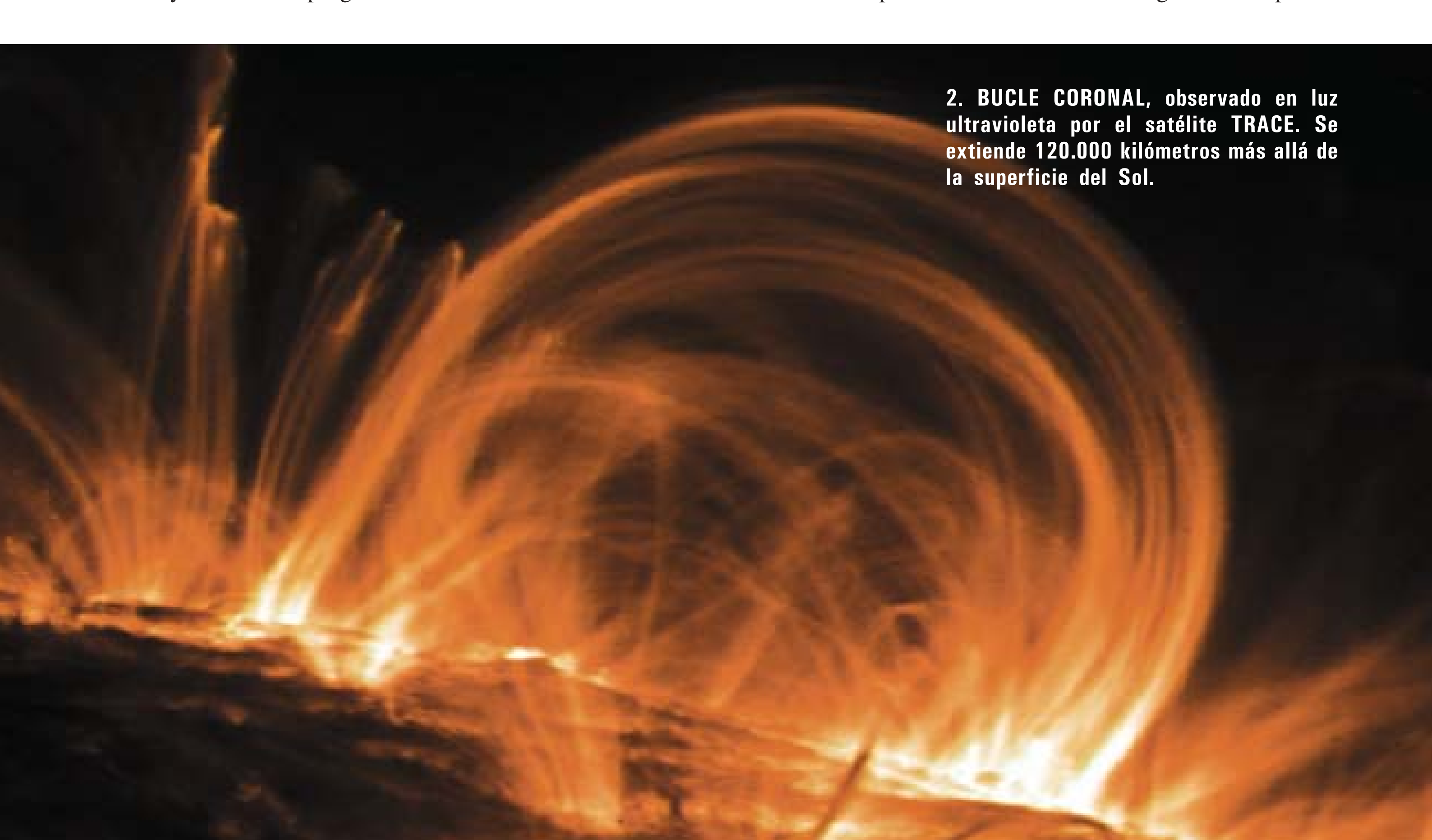
El 11 de agosto de 1999 decenas de millones de personas de Asia y Europa fueron testigos de uno de los espectáculos más hermosos de la naturaleza: un eclipse total de sol. Nosotros estuvimos entre ellos. Desde Bulgaria, Phillips observó la ocultación del brillante disco solar tras la oscura y fría Luna, dando paso así al fantástico destello de la corona. Desde la India, Dwivedi hubo de contentarse con el obscurecimiento del disco luminoso del Sol por una capa espesa de nubes. Pero no todo estaba perdido. Por la orilla del Ganges, descendía un gentío entonando cantos que pedían la reaparición de su divinidad solar. Desde Africa, en junio de este año, volvimos a vivir la experiencia, simpar, que nos ofrece una ocasión óptima para el estudio de la corona.

Aunque dé la impresión de que consiste en una esfera uniforme de gas, compendio de la simplicidad, la verdad es que el Sol presenta regiones bien definidas, parangonables con el cuerpo sólido y atmósfera de un planeta. La radiación solar, de la que en última instancia depende la vida en la Tierra, se origina en las reacciones nucleares del profundo interior. La energía se filtra gradualmente hacia el exterior hasta que alcanza la fotosfera, o superficie visible, y escapa al espacio. Por encima de la fotosfera hallamos una atmósfera más tenue, cuya región inferior, la cromosfera, forma, vista durante un eclipse total, una suerte de media luna de color rojo brillante. Más allá reside la corona, de blanco nácar, que se extiende millones de kilómetros. De las regiones extremas de la corona emana el viento solar, la corriente de partículas cargadas que atraviesa el sistema solar.

Según cabe esperar, la temperatura del Sol disminuye de forma progresiva desde el núcleo —a 15 millones de kelvin— hasta la fotosfera, apenas 6000 kelvin. Pero luego se produce un fenómeno paradójico: el gradiente de temperatura se invierte. En la cromosfera, la temperatura aumenta gradualmente hasta los 10.000 kelvin y, entrando en la corona, salta hasta el millón de kelvin. Temperatura que rompe incluso ese techo en ciertas regiones de la corona asociadas con las manchas solares. ¿Qué explicación darle, habida cuenta de que la energía se origina bajo la fotosfera? Por acudir a una comparación llana, es como si ganáramos calor a medida que nos alejamos del fuego.

Los primeros indicios de ese enigma se manifestaron en el siglo XIX cuando la observación de los eclipses reveló líneas espectrales en emisión de elementos que no se supo identificar. En los años cuarenta del siglo XX los físicos asociaron dos de estas líneas con los átomos de hierro que han perdido hasta la mitad de su dotación normal de 26 electrones: una situación que requiere temperaturas extremadamente altas. Más tarde, los instrumentos a bordo de sondas espaciales descubrieron que el Sol emite cantidades importantes de rayos X y de radiación en el ultravioleta extremo, fenómeno que sólo podía darse si la temperatura de la corona alcanzaba los megakelvin. Acontece, además, que la mayoría de las estrellas de tipo solar tienen atmósferas que radian en rayos X.

La solución, sin embargo, parece ahora al alcance de la mano. Los astrónomos han asociado los campos magnéticos al calentamiento coronal; allá donde el campo es más intenso, la corona registra superior temperatura. Estos campos pueden transportar energía de forma no térmica, esquivando así las restricciones de la termodinámica habituales. Pero la energía tendrá que convertirse a la postre en calor. Para explicar el fenómeno se están sometiendo a prueba dos mecanismos posibles: reconexiones magnéticas a pe-



**2. BUCLE CORONAL, observado en luz ultravioleta por el satélite TRACE. Se extiende 120.000 kilómetros más allá de la superficie del Sol.**



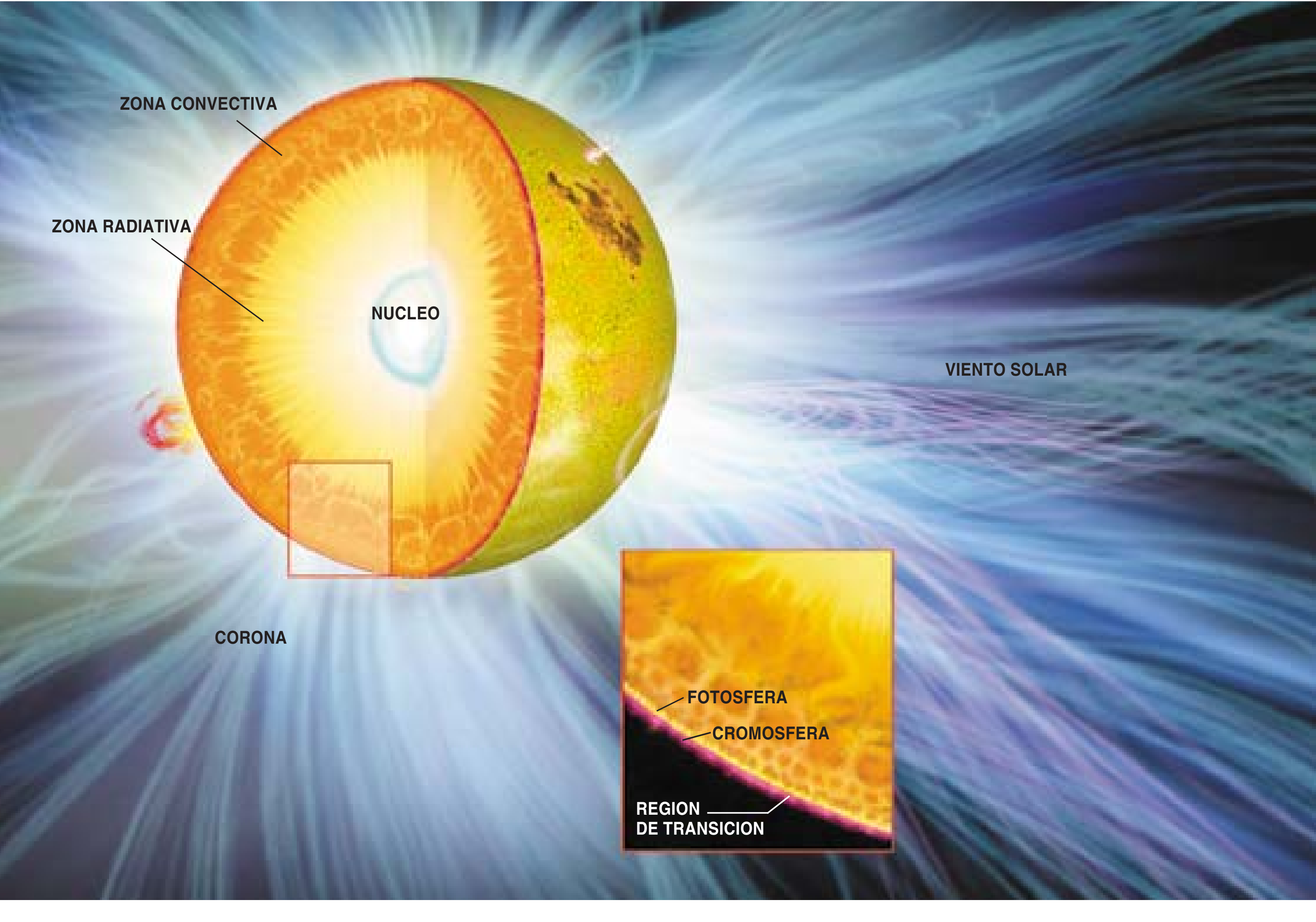
**3. ESTRUCTURAS BRILLANTES** (asociadas a las manchas solares) y oscuras (agujero polar en la corona), puestas de manifiesto en esta imagen en rayos X tomada por la sonda Yohkoh.

queña escala —el mismo proceso involucrado en las fulguraciones solares— y las ondas magnéticas. Debemos algunas pistas a ciertas observaciones complementarias: las sondas espaciales pueden observar en longitudes de onda inaccesibles desde la Tierra, en tanto que los telescopios terrestres pueden reunir grandes cantidades de datos sin estar limitados por el ancho de banda de las radiocomunicaciones con el satélite en órbita. Los resultados podrían arrojar luz decisiva a la hora de entender la influencia de los procesos solares en la atmósfera terrestre [*véase* "Tormentas espaciales", por James L. Burch; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2001].

Las primeras imágenes de alta resolución de la corona las obtuvieron telescopios que operan en el ultravioleta y en rayos X a bordo del Skylab, la estación espacial norteamericana habitada durante 1973 y 1974. Las fotografías de las regiones activas de la corona, ubicadas por encima de grupos de manchas, mostraron unas asociaciones de bucles que aparecían y desaparecían en cuestión de días. Y unos arcos difusos de rayos X se extendían por millones de kilómetros. Alejada de las regiones activas, en las zonas "tranquilas" del Sol, la radiación ultravioleta dibujaba una suerte de panal de abejas, estructura relacionada con la granulación de la fotosfera. Cerca de los polos solares se encontraron unas regiones de baja emisión X, los agujeros coronales.

## Conexión con la dinamo estelar

Los satélites solares lanzados con posterioridad al Skylab han ofrecido una resolución cada vez mejor. Desde 1991 el telescopio de rayos X instalado a bordo del satélite japonés Yohkoh toma rutinariamente fotografías de la corona solar, con el fin de seguir la evolución de los bucles y de otros rasgos a lo largo de un ciclo entero de 11 años de actividad solar. El Observatorio Solar y Heliosférico (SOHO), lanzado en 1995 y fruto de la colaboración europea y




**4. AUNQUE El SOL pudiera parecer una bola uniforme, consta de una serie de capas bien definidas.**

norteamericana, orbita a una distancia de 1,5 millones de kilómetros de la Tierra en el lado iluminado por el Sol, permitiendo que el satélite tenga siempre una visión ininterrumpida del astro [*véase* "El SOHO revela los secretos del Sol", por Kenneth R. Lang; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1997]. El coronógrafo espectroscópico de gran ángulo (LASCO) que lleva consigo realiza observaciones en luz visible gracias a un disco opaco que cela buena parte del disco solar. Este instrumento ha seguido las macroestructuras coronales en su rotación con el resto del Sol (un período de unos 27 días tal y como se ve desde la Tierra). Las imágenes muestran unas gigantescas burbujas de plasma, las eyecciones de masa coronal, que se mueven a unos 2000 kilómetros por segundo; salen expulsadas de la corona y, en ocasiones, chocan con la Tierra y otros planetas. Porta el SOHO, entre otros instrumentos, un telescopio de registro de imágenes en el ultravioleta extremo, que ha mejorado enormemente la calidad de las fotografías del Skylab.

El satélite explorador de la región de transición y la corona (TRACE), operado por el Instituto Stanford-Lockheed de Investigaciones Espaciales, se mantuvo en una órbita polar alrededor de la Tierra en 1998. Con una resolución sin precedentes, su telescopio ultravioleta ha revelado pormenores sin cuento. Sabemos ya que los bucles de las regiones activas constituyen estructuras filiformes cuya anchura mide escasos centenares de kilómetros. Sus incesantes parpadeos y vaivenes apuntan al origen de las altas temperaturas de la corona.

Bucles, arcos y agujeros coronales delinean la trayectoria de los campos magnéticos del Sol. Se cree que esos campos nacen en el tercio superior del interior solar, donde la energía se transporta por convección y no por radiación. La circulación, que actúa como una dinamo natural, convierte alrededor del 0,01 % de la radiación emergente en energía magnética. La rotación diferencial —en razón de la cual las bajas latitudes rotan ligeramente más céleres que las altas latitudes— distorsiona las líneas de campo en figuras características. En los lugares señalados por los grupos de manchas solares, los haces de líneas de fuerza penetran en la fotosfera y se extienden hacia la corona.

Desde hace un siglo, los astrónomos vienen midiendo el magnetismo de la fotosfera utilizando los magnetógrafos, que expresan el efecto Zeeman: en presencia de un campo magnético, una línea espectral puede escindirse en dos o más líneas con longitudes de onda y polarización ligeramente diferentes. Pero hasta ahora no se han realizado observaciones

Zeeman de la corona; las líneas espectrales de esta región presentan un desdoblamiento muy pequeño que los instrumentos son incapaces de resolver. Por ello los astrónomos han tenido que apoyarse en extrapolaciones matemáticas del campo fotosférico. De acuerdo con tales cálculos, la intensidad del campo magnético de la corona se cifraría en unos 10 gauss, 20 veces superior al campo magnético terrestre en los polos. En las regiones activas, el campo puede alcanzar los 100 gauss.

### Radiadores espaciales

Comparados con los que pueden generarse en los imanes de los laboratorios, son campos débiles. Suficientes, empero, para ejercer una influencia decisiva en la corona. La explicación yace en la temperatura de la corona, tan alta que el gas de la misma se halla completamente ionizado: es un plasma compuesto de protones, electrones y núcleos atómicos (helio sobre todo), no de átomos neutros. Los plasmas están sometidos a múltiples fenómenos que no experimentan los gases neutros. Los campos magnéticos de la corona adquieren intensidad suficiente para adherir las partículas cargadas a las líneas de campo. Las partículas se mueven en trayectorias helicoidales a lo largo de tales líneas, cual perlitas minúsculas sobre hilos muy largos. Los límites de su movimiento explican las fronteras nítidas de los agujeros y otras estructuras coronales. Dentro del plasma tenue, la presión magnética (proporcional al cuadrado de la intensidad) supera la presión térmica en un factor 100 por lo menos.

Una de las razones principales por la que los astrónomos están convencidos de que los campos magnéticos proporcionan energía a la corona estriba en la relación tan clara entre intensidad del campo y temperatura. Los bucles brillantes de las regiones activas tienen una temperatura alrededor de 4 millones de kelvin, mientras que los arcos gigantes de la corona apenas alcanzan el millón de kelvin.

Sin embargo, hasta ayer mismo, atribuir el calentamiento coronal a los campos magnéticos planteaba una grave dificultad. Para convertir la energía del campo en energía calorífica, los campos deben poder difundirse en el plasma, lo que implica, a su vez, que la corona ofrezca cierto grado de resistividad eléctrica, que no sea un conductor perfecto. El campo eléctrico no puede mantenerse con un conductor perfecto, porque las partículas cargadas se recolocan instantáneamente para neutralizarlo. Y si un plasma es incapaz de sostener un campo eléctrico, no puede moverse en relación al campo magnético (o viceversa); si lo hiciera, induciría un campo eléctrico. De ahí que los astrónomos hablen de campos magnéticos “congelados” en los plasmas.

Para cuantificar este principio, se atiende al tiempo que el campo magnético tarda en propagarse cierto trecho por el plasma. La velocidad de difusión es inversamente proporcional a la resistividad. De acuerdo con la física clásica de plasmas, la resistencia eléctrica se funda en las colisiones de Coulomb: las fuerzas electrostáticas de las partículas cargadas rechazan el flujo de electrones. Si así fuera, se necesitarían unos 10 millones de años para recorrer 10.000 kilómetros, la longitud típica de los bucles de las regiones activas.

Los sucesos desarrollados en la corona —pensemos en las fulguraciones, que duran a veces escasos minutos— rebasan con creces esa velocidad. Por eso, se exige una resistividad muy elevada o una distancia de la difusión cortísima, si no ambas cosas. Una distancia de metros valdría sólo para determinadas estructuras, acompañadas de un brusco gradiente magnético. Pero los astrónomos se han percatado de que la resistividad podría ser mayor de lo que tradicionalmente se venía admitiendo. En años recientes se han observado inestabilidades en plasmas de laboratorio, parecidas a las que se producen en los experimentos de fusión. Esas inestabilidades pueden generar una turbulencia a pequeña escala y fluctuaciones de la carga eléctrica global, representando una fuente de una resistencia más potente que el encuentro fortuito entre partículas.

### Bases teóricas

Existen dos teorías fundamentales en torno al calentamiento coronal. Durante años se insistió en el calentamiento por ondas. Se comenzó con las ondas de sonido. Pero a finales de los años setenta se estableció que las ondas de sonido emergentes de la fotosfera se disipan en la cromosfera, sin poder suministrar energía a la corona. Las sospechas recayeron en las ondas magnéticas, quizá puramente magnetohidrodinámicas (MHD); en estas ondas de Alfvén, así se llaman, las líneas de campo oscilan, pero no la presión. Parece, sin embargo, que comparten propiedades de las ondas de sonido y de las ondas Alfvén.

La tesis MHD combina dos teorías —hidrodinámica y electromagnetismo— harto complejas, sin menoscabo de la claridad de sus principios generales. En física de plasmas se reconocen dos clases de ondas de presión MHD, modo rápido y lento, dependiendo de la velocidad de fase relativa a una onda de Alfvén: unos 2000 kilómetros por segundo en la corona. Para cruzar un bucle típico de una región activa una onda de Alfvén necesita unos cinco


## Los autores

BHOLA N. DWIVEDI y KENNETH J. H. PHILLIPS iniciaron, diez años atrás, una investigación conjunta sobre física solar. Dwivedi, docente en la Universidad de Benarés, ha venido trabajando con SUMER, un telescopio ultravioleta a bordo del satélite SOHO; el Instituto Max Planck de Aeronomía le ha galardonado recientemente con una de sus máximas distinciones. Phillips, director del grupo de investigación solar del laboratorio Rutherford de Didcot, ha utilizado instrumentos de rayos X y ultravioleta a bordo de numerosos satélites —OSO-4, SolarMax, IUE, Yohkoh y SOHO— y ha observado eclipses solares con videocámaras CCD.

segundos; tarda menos una onda MHD rápida, mientras que una onda lenta emplea medio minuto o más. Las ondas MHD se generan en virtud de las perturbaciones convectivas de la fotosfera; llegan a la corona transportadas por los campos magnéticos. Depositan su energía en el plasma si éste tiene resistividad o viscosidad suficientes.

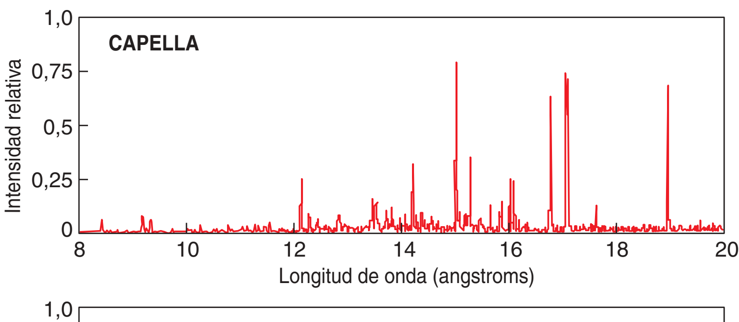
En 1998 se dio un importante paso al frente. La sonda satélite TRACE observó una fulguración espectacular que desencadenó unas ondas en los bucles inmediatos. Estas ondas oscilaron hacia delante y atrás varias veces antes de calmarse. Pero la velocidad de atenuación multiplicaba millones de veces la celeridad predicha por la teoría clásica. Esta observación sin precedentes de un "seísmo coronal", realizada por el equipo de Valery M. Nakariakov, de la Universidad escocesa de St. Andrews, demostró que las ondas MHD podían depositar su energía en la corona.

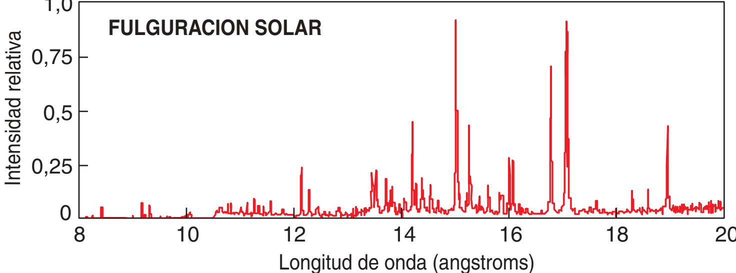
Pese a la plausibilidad del transporte energético por ondas, comienza a ganar terreno una segunda teoría. Atribuye el calentamiento coronal a sucesos similares a las fulguraciones, más pequeños. La fulguración consiste en la liberación repentina de hasta $10^{25}$ joule de energía en una región activa del Sol. Se origina, al parecer, en virtud la reconexión de las líneas del campo magnético, donde las líneas dirigidas en sentidos contrarios se cancelan entre sí, convirtiendo energía magnética en calor. Este proceso requiere que las líneas de fuerza puedan difundirse por el interior del plasma.

Una fulguración es una fuente de estallidos de rayos X y radiación ultravioleta. En el máximo del ciclo de actividad solar (en él nos hallamos), pueden ocurrir hasta varias fulguraciones por hora en la superficie solar. Las sondas Yohkoh y SOHO han mostrado que otros sucesos bastante menores, aunque más frecuentes, no sólo se dan en las regiones activas, sino también en regiones reputadas tranquilas. Estos sucesos pequeños cuentan con una millonésima parte de la energía de una fulguración; por eso se les llama microfulguraciones. En 1980 el grupo de Robert P. Lin, de la Universidad de California en Berkeley, registró, a través de un detector instalado en un globo, emisiones en rayos X duros procedentes de ellos. Durante el mínimo solar de 1996, la sonda Yohkoh identificó eventos de sólo $10^{17}$ joule.

Las fulguraciones no son los únicos sucesos transitorios que acontecen en el astro. Se detectan con frecuencia chorros de rayos X y ultravioletas, que representan columnas de materia coronal, expulsados desde la región inferior de la corona a velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo. Pero estas microfulguraciones de rayos X son de especial interés porque alcanzan las temperaturas de megakelvin necesarias para calentar la corona. Nosotros, junto con Pawel T. Pres, de la Universidad polaca de Wroclaw, descubrimos, basándonos en un trabajo del físico solar Eugene N. Parker, de la Universidad de Chicago, que la frecuencia de fulguraciones podía extrapolarse hasta eventos aún menores, las nanofulguraciones. La energía total podría dar cuenta del flujo radiativo emergente de la corona, cifrado en aproximadamente $3 \times 10^{18}$ watt.

¿Cuál es el mecanismo dominante, las ondas o las nanofulguraciones? Depende de los movimientos fotosféricos que perturben al campo magnético. Si estos movimientos operan en escalas temporales de medio minuto o más, no podrán desencadenar ondas MHD. Antes bien, originarán capas estrechas de corriente donde puedan darse las reconexiones. La torre solar sueca de La Palma, en las islas Canarias, ha obtenido imágenes ópticas de altísima resolución de unas estructuras muy brillantes con forma de filigranas; estas observaciones, junto con los datos de SOHO y TRACE de la siempre cambiante "alfombra magnética" en la superficie del Sol, demuestran que los movimientos fotosféricos se desarrollan en múltiples escalas temporales. Aunque los datos recogidos se inclinan por las nanofulguraciones como la fuente del calentamiento coronal, es posible que las ondas desempeñen también un papel relevante.




**5. LOS ESPECTROS DE RAYOS X de las estrellas gemelas Capella (entre fulguraciones) y del Sol (durante el episodio de una fulguración) indican una temperatura de seis millones de kelvin: un valor típico de Capella, pero desproporcionadamente alto en el Sol.**

## Trabajo experimental

Es muy improbable, por ejemplo, que las nanofulguraciones ejerzan algún efecto en los agujeros coronales. En estas regiones, las líneas de campo se abren al espacio exterior y no se cierran en el Sol, por lo que la reconexión aceleraría el plasma hacia el medio interplanetario, más que calentarlo. Sin embargo, la corona sigue estando muy caliente en los agujeros. Los astrónomos han buscado indicios de movimientos ondulatorios, por ejemplo, fluctuaciones periódicas de luminosidad o corrimientos Doppler. La dificultad radica en que las ondas MHD que calientan el medio tienen períodos probablemente



**6. LUZ COMUN, VISION EXTRAORDINARIA: la corona fotografiada en luz visible el 11 de agosto de 1999 desde Chadegan en el centro de Irán.**

muy cortos, quizá de unos pocos segundos. Los dispositivos de captación de imágenes a bordo de las sondas espaciales carecen todavía de capacidad para recogerlos.

Por este motivo, los instrumentos de tierra siguen siendo importantes. Pionero en tales investigaciones ha sido Jay M. Pasachoff, del Colegio Universitario Williams. Desde hace veinte años ha venido utilizando detectores de alta velocidad para buscar posibles modulaciones de la luz coronal durante los eclipses. Los análisis de sus mejores datos indican que existen oscilaciones con períodos de uno a dos segundos. Con un coronógrafo, Serge Koutchmy, del Instituto de Astrofísica de París, ha encontrado períodos de 43, 80 y 300 segundos.

La búsqueda de estas oscilaciones es lo que llevó a Phillips y a su equipo a Shabla, ciudad de la costa del mar Negro en Bulgaria, durante el eclipse de agosto de 1999. Nuestro instrumento constaba de un par de videocámaras CCD de rápida lectura que observaban simultáneamente la luz blanca y la línea espectral verde del hierro altamente ionizado. El espejo guía, o heliostato, dirigía la luz solar a lo largo de un haz horizontal hacia el instrumento. Durante los 2 minutos y 23 segundos del eclipse total, el instrumento tomó 44 imágenes por segundo. Los análisis realizados por Pawel Rudawy, de Wroclaw, y David A. Williams, de la Universidad Queen de Belfast, mostraron unas oscilaciones locales, generalmente a lo largo de las estructuras de bucles, con períodos de 2 a 10 segundos. En otros lugares, sin embargo, no detectamos ninguna oscilación. Parece probable, pues, que las ondas MHD estén presentes en la corona, aunque no en el grado de difusión e intensidad suficientes para determinar el calentamiento coronal. Ese equipo lo trasladamos a Zambia para el eclipse del 21 de junio y lo adaptamos a un coronógrafo. (Aunque el disco opaco de un coronógrafo permite observar, no tapa la luz del Sol con la eficacia con que lo hace la Luna en un eclipse.)

Nuestro conocimiento del calentamiento coronal también se ha visto incrementado al estudiar otras estrellas. Con los instrumentos actuales resulta imposible ver directamente las estructuras superficiales de las estrellas, pero los métodos espectroscópicos pueden deducir la presencia de manchas estelares con la espectroscopía. Las observaciones en rayos X y ultravioleta ponen de manifiesto la existencia de coronas y fulguraciones cuya intensidad supera, a menudo, las solares. Los espectros de alta resolución del Explorador Ultravioleta Extremo (EUE) y de los últimos satélites de rayos X (Chandra y XMM-Newton) facilitan medidas de la temperatura y la densidad. Por ejemplo, Capella —un sistema estelar de dos estrellas gigantes— tiene temperaturas fotosféricas similares a las del Sol, pero las temperaturas coronales son seis veces más altas. Las intensidades de las líneas espectrales individuales sugieren una densidad de plasma que centuplica la propia de la corona solar. Esta alta densidad implica que las coronas en Capella son mucho menores que la solar, alcanzando sólo una décima parte o menos del diámetro estelar. La distribución del campo magnético difiere de una estrella a otra. En determinados casos, los planetas en órbitas muy cercanas podrían también influir notablemente.

El misterio que rodea al calentamiento de la corona solar intrigó a los astrónomos durante más de medio siglo. Su origen está ahora al alcance de la mano, gracias a los últimos descubrimientos de las sondas y a las observaciones durante los eclipses. Pero mientras se empieza a correr el velo de un misterio, aparecen otros nuevos. El Sol y otras estrellas, con su compleja estratificación, sus campos magnéticos y el dinamismo efervescente, se resisten todavía a nuestra comprensión. En la era de los exóticos agujeros negros y de la materia oscura, cosas que parecen mundanas nos fascinan con sus paradojas.

## Bibliografía complementaria

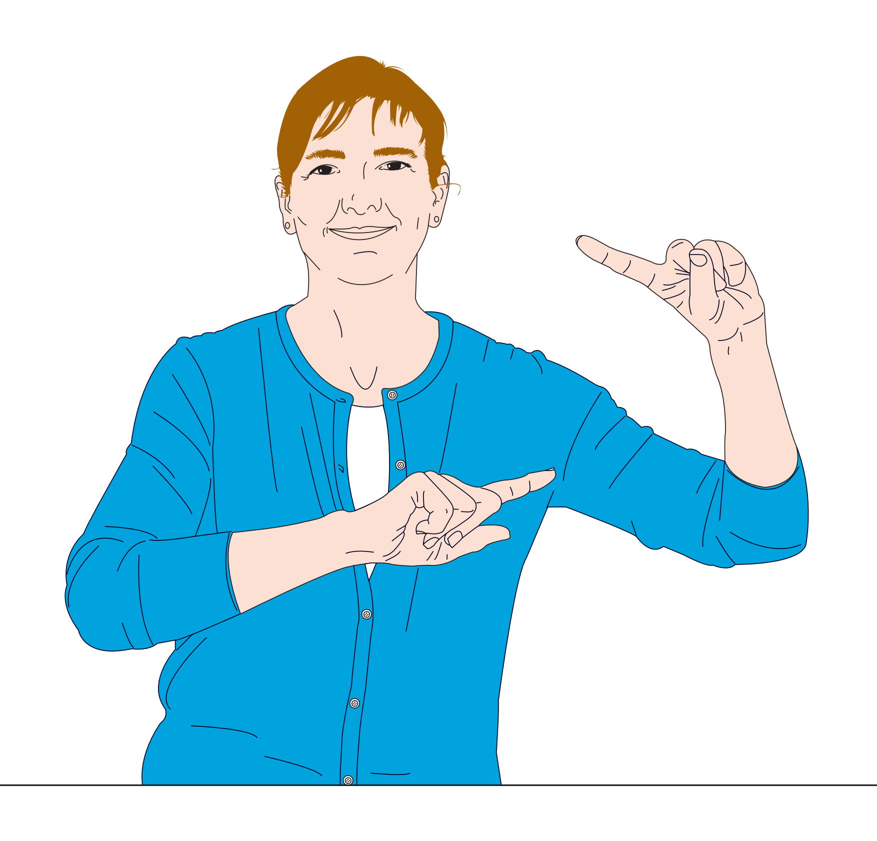

GUIDE TO THE SUN. Kenneth J. H. Phillips. Cambridge University Press, 1992.

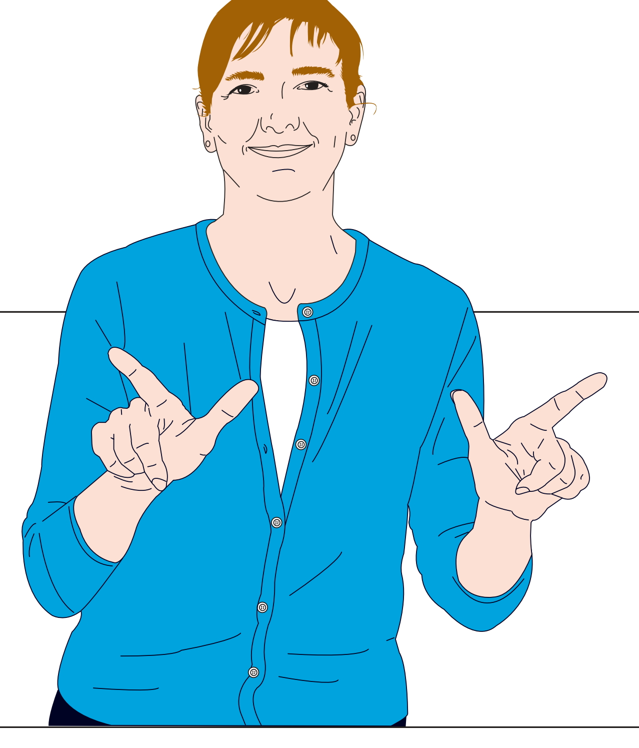
THE SOLAR CORONA ABOVE POLAR CORONAL HOLES AS SEEN BY SUMER ON SOHO. Klaus Wilhelm et al. en *Astrophysical Journal*, vol. 500, n.º 2, págs. 1023-1038; 20 de junio de 1998.

TODAY'S SCIENCE OF THE SUN, PARTS 1 AND 2. Carolus J. Schrijver y Alan M. Title en *Sky & Telescope*, vol. 101, n.º 2, págs. 34-39; febrero 2001; y n.º 3, págs. 34-40; marzo 2001.

GLORIOUS ECLIPSES: THEIR PAST, PRESENT AND FUTURE. Serge Brunier y Jean-Pierre Luminet. Cambridge University Press, 2001.

NEAREST STAR; THE EXCITING SCIENCE OF OUR SUN. Leon Golub y Jay M. Pasachoff. Harvard University Press, 2001.





*¿De qué modo se procesa el lenguaje en el cerebro humano? Nuevos estudios con sordomudos ofrecen indicios de una respuesta*

Entre los grandes misterios del cerebro humano se cuenta la forma en que comprende el lenguaje y lo produce. Hasta hace poco, casi todas las investigaciones al respecto estuvieron fundadas en el estudio del habla en los idiomas europeos más extendidos. Grandes han sido los avances que desde mediados del siglo XIX ha ido logrando la ciencia en la identificación de las regiones cerebrales implicadas en el habla. En 1861, por ejemplo, el neurólogo francés Paul Broca descubrió que los sujetos con dificultad para hablar, a pesar de comprender lo que se les decía, solían tener lesionada cierta zona del hemisferio cerebral izquierdo, hoy conocida por área de Broca. Y en 1874, Carl Wernicke, un médico alemán, descubrió que en ciertos pacientes capaces de expresarse con fluidez, pero que acusaban serias limitaciones de comprensión de lo que oían, era típica una lesión de otra región del hemisferio izquierdo, el "área de Wernicke".

Tales perturbaciones del habla, llamadas afasias, sólo en muy raras ocasiones son resultado de lesiones similares en el hemisferio derecho. Es, en cambio, más frecuente la asociación de lesiones en el hemisferio derecho con fallos espaciovisuales graves, como la incapacidad para copiar un dibujo sencillo.

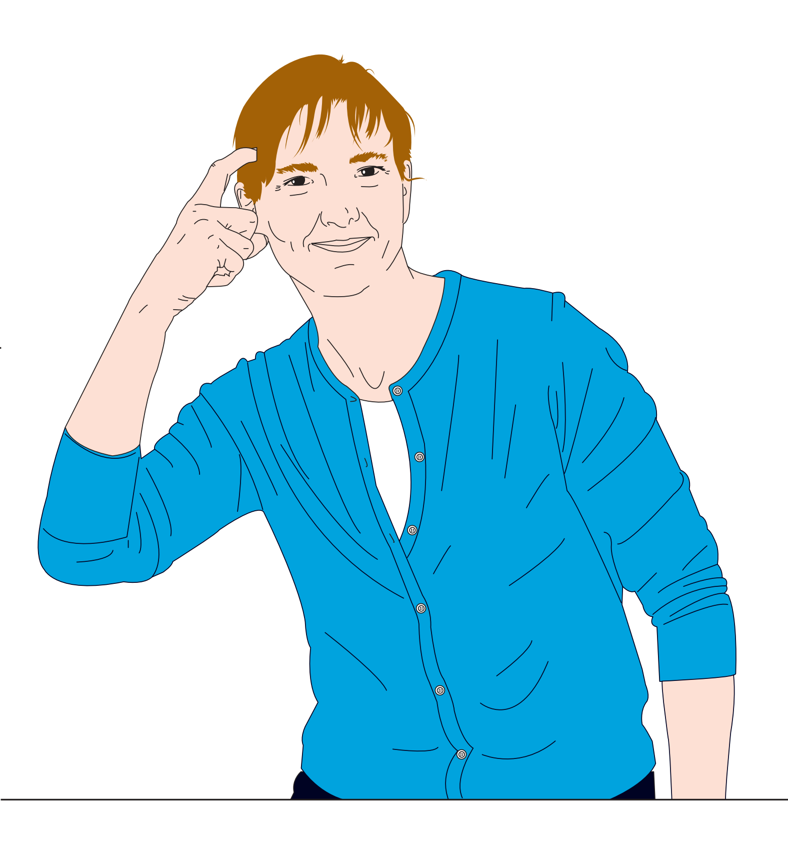
Se suele decir, por ello, que el hemisferio izquierdo es verbal, y el derecho, espacial. A pesar del simplismo de tal dicotomía, esta descripción sí capta algunas de las principales diferencias clínicas entre los individuos que padecen lesiones en el hemisferio cerebral izquierdo y quienes las sufren en el derecho.

Pero son muchos los enigmas que subsisten. Entre los más difíciles, la razón de que el habla se encuentre asentada donde lo está. La ubicación de las áreas de Broca y de Wernicke parece lógica: el área de Wernicke, implicada en la comprensión del habla, se encuentra próxima a la corteza auditiva, región del cerebro que recibe las señales de los oídos. La región de Broca, que participa en la producción del habla, está ubicada al lado de una sección de corteza motora que controla los músculos de la boca y de los labios.

Ahora bien, ¿se funda realmente en las funciones de la audición y del habla la organización cerebral correspondiente al lenguaje?

# El lenguaje de los signos en el cerebro

Gregory Hickok, Ursula Bellugi
y Edward S. Klima





**1. ESTOS DIBUJOS,** basados en fotografías de una sorda gestoparlante, corresponden a la traducción de la frase "El lenguaje de los signos en el cerebro" al ASL (lenguaje mímico estadounidense).

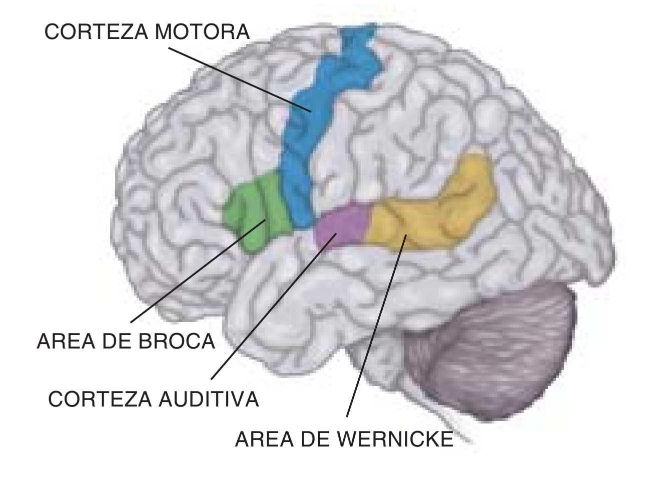
## Los autores

GREGORY HICKOK, URSULA BELLUGI y EDWARD S. KLIMA vienen trabajando, desde hace diez años, en afasias vinculadas al lenguaje de los signos. Hickok enseña en el departamento de ciencias cognitivas de la Universidad de California en Irvine; dirige también el Laboratorio de Investigaciones Cognitivo-cerebrales, donde estudia la anatomía funcional del lenguaje. Bellugi, directora del Laboratorio de Neurociencias Cognitivas del Instituto Salk en La Jolla, se ha centrado en los fundamentos biológicos del lenguaje, en colaboración con Klima, profesor emérito de la Universidad de California en San Diego.

Para explorar esta cuestión conviene estudiar un lenguaje que utilice canales sensoriales y motores distintos. Es obvio que la lectura y la escritura se valen de la vista para la comprensión, y para la expresión, de movimientos de la mano; para muchos, sin embargo, tales actividades dependen también de sistemas cerebrales que participan en un lenguaje hablado. En cambio, la comunicación por señas, como la de los lenguajes mímicos o gestuales de los sordos, cumple los requisitos necesarios. Durante los últimos veinte años nuestro equipo ha examinado grupos de sordos que dominaban el lenguaje gestual y habían sufrido lesiones, ora en el hemisferio cerebral izquierdo, ora en el derecho, a consecuencia, por lo general, de accidentes cerebrovasculares. Mediante la evaluación de su eficiencia en la producción y comprensión de mensajes gestuales, nos propusimos determinar si las regiones cerebrales encargadas de la interpretación y la generación del lenguaje mímico son las mismas que intervienen en el hablado. Los resultados, sorprendentes, han arrojado luz sobre el funcionamiento del cerebro humano y pueden ayudar en el tratamiento de patologías que sufran personas sordas.

## Aquí reside el lenguaje

DOS DE LAS REGIONES del hemisferio cerebral izquierdo que desempeñan papeles importantes en el procesamiento del lenguaje son el área de Broca y el área de Wernicke (existen otras varias). En el individuo con audición, el área de Broca se activa al hablar; lo mismo ocurre en el sordo cuando se expresa por señas. El área de Wernicke interviene tanto en la comprensión de los sonidos del habla como de las señas del lenguaje mímico o gestual.



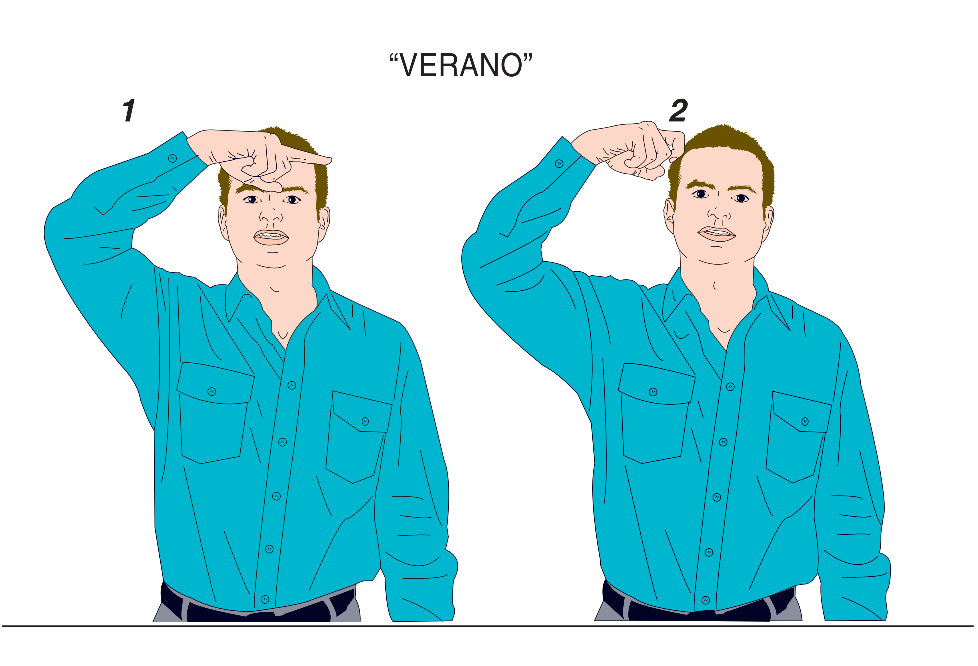

### Los signos del lenguaje

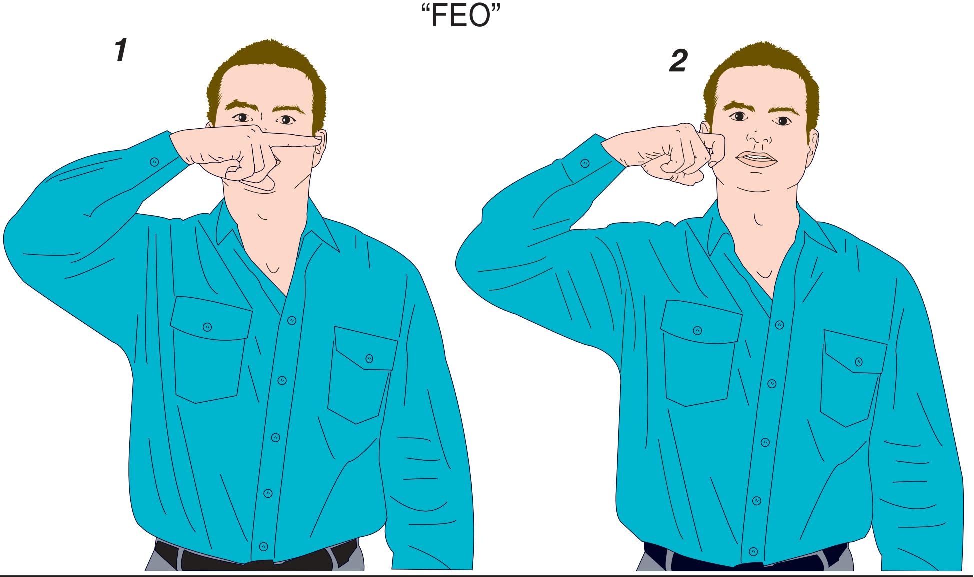
Está muy extendida la errónea opinión de que el lenguaje de señas no es sino una colección deslavazada de gestos y pantomimas, ejecutados para lograr una forma rudimentaria de comunicación. Pero la verdad es que los lenguajes mímicos o gestuales de los sordomudos constituyen sistemas lingüísticos altamente estructurados, de complejidad gramatical equiparable a la de los hablados. Los lenguajes mímicos poseen, lo mismo que nuestro idioma, elaboradas reglas para la formación de los signos individuales y de las frases por ellas expresadas. Asimismo, contra lo que presume un sentir muy difundido, no existe un lenguaje mímico universal. Los sordos de países distintos utilizan señas muy diferentes; de hecho, un sordo que aprenda de adulto un segundo idioma mímico, ¡siempre tendrá "acento" al expresarse! Y, por otra parte, los lenguajes gestuales no son meras traducciones a signos manuales de los lenguajes hablados de su comunidad. Los lenguajes por señas norteamericano (ASL) y británico, por ejemplo, son mutuamente incomprensibles.

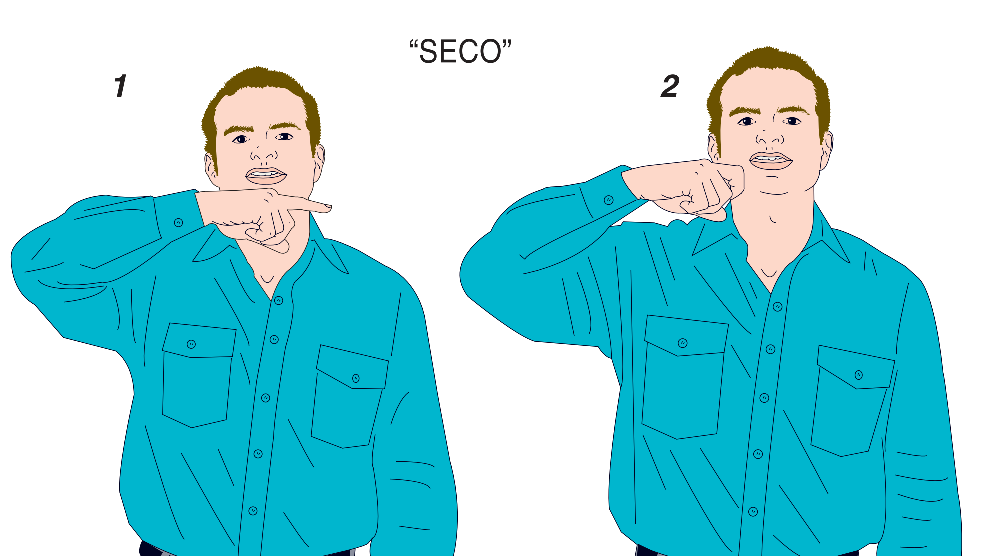
Aunque los lenguajes hablados y gestuales comparten las propiedades abstractas del lenguaje, difieren radicalmente en cuanto a su forma externa. Los lenguajes hablados se codifican mediante cambios acústico-temporales, es decir, variaciones en los sonidos a lo largo del tiempo. Los lenguajes gestuales, en cambio, se basan en cambios espaciovisuales para indicar los contrastes lingüísticos. ¿Cómo afecta esta diferencia formal a la organización neuronal del lenguaje? Por tener los signos un código visual espacial, cabría conjeturar que el lenguaje mímico viniera respaldado por sistemas del hemisferio cerebral derecho. Y correspondientemente, podría aducirse que en los sordos que utilizan lenguajes mímicos el área homóloga del área de Wernicke habría de encontrarse próxima a las regiones cerebrales asociadas al procesamiento visual y que la homóloga del área de Broca se hallaría cerca de la corteza motora que controla los movimientos de las manos y los brazos.

Cuando comenzamos a verificar estas conjeturas, veinte años atrás, vimos necesario dar respuesta a dos cuestiones fundamentales, a saber: ¿presenta deficiencias el lenguaje mímico de los sordos que sufren lesiones cerebrales? Y en caso afirmativo, ¿se asemejan tales minusvalías a la afasia de Wernicke (problemas de comprensión y propensión al error en el habla) o a la afasia de Broca (comprensión correcta, pero dificultad en la producción expedita de lenguaje)? La respuesta, en ambas preguntas, fue rotundamente afirmativa. Uno de los primeros pacientes estudiados por el grupo era capaz de expresarse flui-

# Elementos constructivos del lenguaje gestual




Los lenguajes mímicos, lo mismo que los hablados, poseen diversas clases de estructura lingüística, en la que podemos distinguir los niveles fonológico, morfológico y sintáctico. En el nivel fonológico, las señas constan de un pequeño repertorio de elementos, al igual que las palabras habladas están compuestas por vocales y consonantes. Entre los componentes de las señas se cuentan figuras de las manos, los lugares del cuerpo en que se efectúan las señas, los movimientos de las manos y los brazos, y la orientación de las manos (si la palma mira hacia arriba o hacia abajo). En el lenguaje mímico estadounidense (ASL), las señas correspondientes a “verano”, “feo” y “seco” tienen una misma figura, y el mismo movimiento y orientación, pero difieren en localización. De igual manera, signos como los de “tren”, “cinta” y “silla” comparten la figura de la mano, la orientación y la localización, pero se diferencian en el movimiento.

En el nivel morfológico, el ASL dispone de indicadores gramaticales que cambian sistemáticamente el significado de las señas. Entre los modificadores morfológicos de nuestro idioma se cuentan sufijos como “-ado”, que pospuestos a los verbos los convierten en participios o en adjetivos [amar se convierte en amado]. En los lenguajes orales, hay prefijos y sufijos, pero en ASL las señas se modifican mediante configuraciones espaciales características. Por ejemplo, al añadir un movimiento circular a la seña correspondiente a “dar” (y a la mayoría de las señas verbales de ASL) el significado de la seña cambia a “dar continuamente”. Los gestoparlantes pueden valerse de diversos modificadores para hacer que el verbo signifique “dar a todos”, “dar a cada uno”, “dar uno al otro” y muchas otras variantes.

En el nivel sintáctico, ASL especifica las relaciones gramaticales entre las señas (es decir, quién está haciendo qué a quién) por métodos sin paralelismo en los lenguajes hablados. En éstos, el orden de las palabras suele dar el primer indicio de la organización sintáctica de la palabra, como en “María criticó a Juan”. Al invertir el orden de los sustantivos, la oración pasa a tener significado opuesto. Los comunicantes en ASL pueden servirse también del orden de las palabras, pero no es necesario. En lugar de eso, pueden señalar a un lugar distante en el espacio mientras hacen la seña de un nombre, vinculando así la palabra con la posición. Puede después mover la seña del verbo desde el lugar que corresponde a María hasta el lugar que corresponde a Juan, y expresar así que “María criticó a Juan”, o moverla en sentido inverso para manifestar lo contrario.

**2. LA POSICION DE UN SIGNO con respecto al cuerpo resulta fundamental para su significado. En el ASL, “verano” se articula cerca de la frente, “feo” cerca de la nariz, y “seco” cerca del mentón.**

**3. UN PROBLEMA FRECUENTE de las lesiones en el hemisferio izquierdo (LHI) es la producción de parafasias —lapsus manuales— análogos a los lapsus linguae que experimentan los hablantes con LHI. La ilustración de la derecha muestra la forma correcta de la seña "estoy bien" mientras que en la página siguiente se muestra un error que suelen cometer los individuos con LHI. En ésta, el gestoparlante articuló correctamente la posición y el movimiento de la mano, pero utilizó una figura incorrecta, produciendo una seña sin significación en ASL, una seña absurda, algo así como "es bien" en nuestro idioma. A pesar de que la forma de la mano en esta parafasia exprese incorrectamente "estoy bien", es utilizada en muchos otros signos del ASL, como en "jugar" y "California" Entre las parafasias similares se cuentan errores en la producción de la posición correcta, el movimiento y la orientación de las señas, así como errores de expresión de la estructura sintáctica y morfológica del lenguaje.**




damente por señas y de utilizar todos los marcadores propios de la gramática del ASL, pero el mensaje contenido en sus señas era, con frecuencia, incoherente. Una glosa en español de una de sus expresiones podría decir:

> Y hay uno (camino abajo al final) [ininteligible]. El hombre fue andando para mirar el (inconexo), una extensión de la (tierra) habitación. Es allí para el hombre (puede vivir) un techo y luz con persianas para (seguir tirando hacia abajo).

La desorganización de las expresiones gestuales del paciente, y su manifiesta incomprensión de los signos de otros, mostraban gran parecido con los síntomas observados en sujetos oyentes con afasia de Wernicke. Otro de los pacientes —una mujer sorda— que estudiamos en las primeras fases del programa de investigación experimentaba suma dificultad para expresarse por señas. En casi todas las que intentaba le costaba gran esfuerzo orientar y colocar las manos. La mayoría de sus expresiones se limitaban a signos aislados. No se trataba de un mero problema de control motor: cuando se le pedía que copiase dibujos sencillos (la figura de un elefante o de una flor), los realizaba con precisión. Y además, en contraste con sus graves dificultades para expresarse mediante signos, su comprensión del lenguaje mímico era excelente. Este perfil de facultades lingüísticas corre parejo a los síntomas de la afasia de Broca.

Ahora bien, ¿dónde se encontraban las lesiones cerebrales responsables de estas afasias de los signos? La respuesta resultó sorprendente: en uno y otro caso, las áreas lesionadas correspondían al hemisferio izquierdo. Y hallábanse situadas justo en donde sería de esperar en pacientes con audición normal y dificultades parecidas. Entre las lesiones del sordo que sufría problemas de comprensión se contaba el área de Wernicke, mientras que la paciente con dificultades de mímica el daño le afectaba al área de Broca.

De nuestras observaciones se desprendía que el hemisferio izquierdo desempeñaba un papel crucial en el sostén del lenguaje mímico. Mas, ¿y el derecho? Cabría pensar que las lesiones en el hemisferio derecho, cuya participación parece crítica en muchas funciones de naturaleza visual o espacial, habrían asimismo de tener efectos devastadores sobre la facultad de expresión por señas. Al parecer, esta conjetura es errónea. Los pacientes sordos con lesiones dextrohemisféricas se expresaban por señas con fluidez y precisión, se atenían a las reglas gramaticales y comprendían las señas de otros con facilidad. Esto valía incluso en pacientes cuyas facultades espaciovisuales no lingüísticas habían sufrido mermas importantes debidas a su lesión cerebral. Uno de ellos, con daño en el hemisferio derecho, era incapaz de crear o de copiar dibujos reconociblemente, y tampoco lograba observar objetos situados hacia la izquierda de su campo visual (anulación hemiespacial). A pesar de ello podía comunicarse muy eficientemente en lenguaje gestual.

Las investigaciones subsiguientes, con grupos más amplios de sordomudos que se comunicaban por señas, vinieron a confirmar los primeros casos. En un estudio de nuestro equipo, publicado en 1996, eran comparadas las capacidades de comunicación gestual de 13 pacientes con lesiones en el hemisferio izquierdo (LHI) y las de otros 10 con lesiones en el hemisferio derecho (LHD). En su conjunto, los sujetos con LHI

demostraron grandes mermas en un amplio repertorio de evaluaciones del grado de comunicación por señas. Tenían dificultad para la comprensión tanto de señas aisladas como de frases; no pocas veces, mostraron dificultades de fluidez en la expresión. También encontraron dificultades para decir qué representaban ciertas figuras, e incurrieron con frecuencia en errores parafásicos —lapsus de la mano— sustituyendo sin querer algún signo por otro, o algún componente de un signo, como, por ejemplo, la figura que ha de formar la mano. Los sujetos con LHD, en cambio, realizaron bien todas estas tareas. En el estudio quedó manifiesto que las dificultades para la expresión gestual fluida no estaban causadas por problemas más generales de control de los movimientos voluntarios de la mano o del brazo, pues pacientes con dificultad para construir los signos del lenguaje solían ser capaces de gesticular con la mano o el brazo, aunque sus gestos carecían de significado.

Parecidos resultados fueron los obtenidos en otro estudio, centrado esta vez en la comprensión del lenguaje mímico en 19 lesionados cerebrales que habían practicado la comunicación gestual durante toda su vida, de los cuales 11 sufrían lesiones en el hemisferio izquierdo, y 8, en el derecho. El grupo LHI se desenvolvió bastante peor que el grupo LHD en tres pruebas, que evaluaban, respectivamente, la comprensión de signos sueltos, de frases sencillas y de frases complejas. Las deficiencias más acusadas correspondían a lesionados en el lóbulo temporal izquierdo, donde se ubica el área de Wernicke.

Tomados en conjunto, estos hallazgos sugieren que, para el lenguaje por señas, al igual que para el habla sonora, el hemisferio cerebral izquierdo es el dominante. En lo que al lenguaje se refiere, la organización del cerebro no parece estar especialmente afectada por la forma en que se percibe o produce aquél.



EXPRESION INCORRECTA DE “ESTOY BIEN”, TIPICA DE UN GESTOPARLANTE CON LESIONES EN EL HEMISFERIO IZQUIERDO

## La historia se complica

Como se hizo notar al principio de este artículo, la presunta dicotomía levo-dextrohemisférica del cerebro, con las facultades verbales concentradas en el hemisferio izquierdo, y las de carácter visual y espacial, en el derecho, peca de simplista. Las investigaciones de los últimos decenios han revelado que la mayoría de las capacidades cognitivas pueden dividirse en multitud de pasos de procesamiento. En ciertos niveles, la actividad cerebral puede hallarse lateralizada (y tener lugar básicamente en un hemisferio), mientras que en otros la actividad puede ser bilátera (y producirse en ambos).

La facultad del lenguaje, por ejemplo, consta de muchos componentes. Una persona con audición es capaz de percibir y distinguir los sonidos aislados del habla y las palabras que éstos componen; pero puede a veces resultarle difícil distinguir entre “poca” y “boca”. Ha de lograr, por otra parte, distinguir las desinencias morfológicas (“andando”, “anduvo”), las construcciones sintácticas (“el perro ahuyentó al gato” en contraposición a “el gato ahuyentó al perro”), los matices de entonación (por ejemplo, “Casablanca” frente a “casa blanca”) y demás rasgos suprasegmentales. Por último, para efectuar un discurso extenso es preciso establecer y mantener vínculos coherentes entre los individuos, los lugares y los acontecimientos a lo largo de un gran número de oraciones.

De todos los aspectos que entraña la competencia lingüística, la más nítidamente restringida al hemisferio izquierdo es la producción de lenguaje. Las lesiones del hemisferio izquierdo suelen mermar la capacidad de seleccionar y ensamblar los sonidos y palabras idóneos para hablar. Las lesiones del hemisferio derecho raramente comportan tales efectos. Tenemos en la creación de un discurso coherente una de las excepciones del monopolio que sobre la producción de lenguaje ejerce el hemis-

ferio izquierdo. Los pacientes que han sufrido lesiones en el hemisferio derecho pueden ser capaces de construir perfectamente palabras y frases, pero es frecuente que vayan saltando de un asunto a otro con sólo un débil enlace entre temas.

La percepción y la comprensión del lenguaje parecen estar menos confinadas en el hemisferio izquierdo que su producción. Ambos hemisferios son capaces de distinguir sonidos individuales del habla, y parece que el derecho desempeña un papel en la comprensión de un discurso extenso. Pero la descodificación del significado de las palabras y las frases parece tener lugar primordialmente en el hemisferio izquierdo. Ello puede explicar por qué se consideró en un principio que el lenguaje era una provincia perteneciente en exclusiva al hemisferio izquierdo: los tests de afasia más utilizados evaluaban la comprensión y la producción de palabras y de frases, pero no las de explicaciones largas.

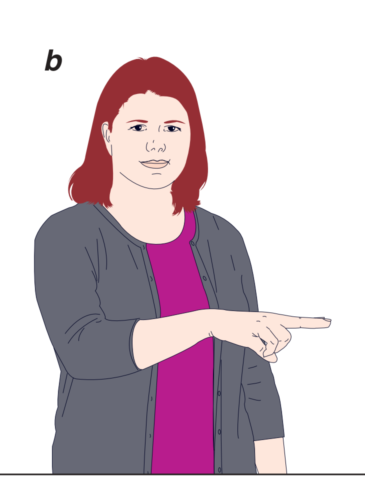
Las facultades no lingüísticas de carácter espacial pueden también subdividirse en componentes con distintas pautas de lateralización. Si bien la mayoría de las deficiencias muy severas de carácter espacial resultan casi siempre de la lesión del hemisferio derecho (tanto en las poblaciones de sordos como en las de oyentes), los investigadores han observado deficiencias de índole visual espacial en sujetos con audición y lesiones en el hemisferio izquierdo. Entre los síntomas típicos se cuentan dificultades en la percepción o reproducción de las características de nivel local de un estímulo visual, como los detalles de un dibujo, incluso a pesar de que los pacientes con LHI sean capaces de identificar o reproducir correctamente la disposición general de la ilustración. Los individuos oyentes con LHD tienden a mostrar la pauta contraria. De ahí la importancia atribuida al hemisferio izquierdo en la percepción y manipulación espacial de nivel local, mientras que el hemisferio derecho intervendría en los procesos de nivel global.

Esta imagen más elaborada del cerebro plantea una interesante cuestión: ¿guarda relación semejante reparto de capacidades espaciovisuales entre los dos hemisferios —capacidades de nivel local en el izquierdo, de nivel global en el derecho— con el reparto de capacidades para el lenguaje por señas? Se puede considerar que tanto las señas individuales como las frases constituyen piezas del lenguaje, mientras que un discurso extenso puede representar la forma en que tales piezas se ensamblan. Cabría que el hemisferio izquierdo dominara en la producción y comprensión de señas y frases porque estos procesos dependieran de capacidades espaciales de nivel local. Y pudiera ser que el hemisferio derecho predominara a la hora de establecer y mantener un discurso coherente en lenguaje de señas porque estos procesos dependieran de capacidades de nivel global.

Nos dispusimos a verificar estas hipótesis. Nuestra investigación confirmó que muchas de las personas sordas con LHD que se expresan por señas encuentran difíciles los párrafos prolongados: su narración está llena de incisos y comentarios tangenciales e incluso de fabulaciones; dificultades que también suelen sufrir los pacientes con audición y LHD. Pero algunos sordos con LHD han de habérselas con otro tipo de problema al expresarse por señas. En el lenguaje gestual, el discurso tiene una organización espacial peculiar; cuando cuenta por señas una historia que

**4. EN ESTA SERIE DE DIBUJOS podemos ver el correcto mantenimiento de un sistema de referencia espacial a lo largo de un discurso extenso en ASL. La locutora está describiendo una serie de fotos en las que aparecen dos niños, sentados a uno y otro lado de una mesa, cada uno pintando la cara del otro. Al principio del discurso, la locutora vinculó a cada niño con una posición concreta en el espacio: Alicia se encuentra a la derecha de la locutora y Benito (*no mostrado*), a su izquierda. Leves modificaciones en la postura de la hablante y de la dirección del movimiento de la seña correspondiente a “pintar” (que va desde la posición de Alicia, a su derecha, hasta la de Benito, a su izquierda) expresan que Alicia está pintando a Benito (*a, b*). Los movimientos de orientación contraria (*c, d*) expresan que Benito está pintando a Alicia.**





















**5. MUCHOS GESTOPARLANTES SORDOS que sufren lesiones en el hemisferio derecho cometen errores en la organización espacial en su discurso. Aunque son capaces de concatenar correctamente los personajes de su narración con lugares del espacio, suelen incurrir en incoherencias al referirse a ellos. En los dibujos, la locutora no vincula la seña correspondiente a "pintar" con las posiciones de Alicia y de Benito. Un equivalente verbal de esta inespecificidad podría ser: "Alicia y Benito están sentados ante una mesa, pintando. De pronto alguien pintó sobre la cara de alguien (*e, f*), y después alguien pintó en la cara de alguien (*g, h*)."**

tiene muchos personajes, para identificar a cada uno se le asigna una determinada ubicación en el espacio. El espacio situado frente al narrador se convierte en una especie de escenario o pizarrón virtual, en el que cada personaje ocupa un puesto propio. Nuestros estudios descubrieron que algunos de los narradores con LHD conseguían centrarse en un tema en su discurso, pero no eran capaces de situar un marco espacial para los personajes de sus narraciones.

¿Se encuentra alguno de estos tipos de dificultades discursivas que sufren los pacientes con LHD causalmente vinculado con deficiencias en sus facultades espaciales no lingüísticas? Parece ser que no. Fue estudiado un sordo con LHD que sufría graves limitaciones de carácter espacial, a pesar de lo cual no tenía dificultad en enhebrar por señas una historia coherente. Otro paciente con LHD, que sólo sufría leves problemas espaciovisuales, era, sin embargo, incapaz de definir un marco espacial adecuado para los personajes de su narración. Resulta claro que los sistemas cognitivos del hemisferio derecho que son soporte de las facultades espaciales no lingüísticas difieren de las utilizadas para mantener un discurso prolongado.

¿Qué decir de los gestoparlantes sordos con lesiones en el hemisferio izquierdo? ¿Están sus afasias del lenguaje mímico provocadas por deficiencias en facultades espaciales de nivel local? Para ocuparnos de esta cuestión, solicitamos a un grupo de sordos que reprodujeran dibujos lineales y figuras jerárquicas, dotadas de características reconocibles de tipo local y de tipo global. (Un ejemplo podría ser una letra "D" formada por una multitud de pequeñas "y".) Lo mismo que los pacientes con audición que sufren lesiones en el hemisferio izquierdo, los sujetos sordos con LHI propendían a reproducir correctamente la configuración global de los dibujos, pero solían prescindir de algunos de los detalles. (Los sordos con LHD exhibían el patrón contrario, y dibujaban figuras con muchos detalles, pero desorganizados en el todo.) No encontramos correlación entre la severidad de las deficiencias espaciales de nivel local en los sujetos con LHI y la severidad de sus afasias. Contra lo esperado, las facultades de expresión de gestoparlantes de toda la vida parecen ser independientes de sus destrezas espaciales no lingüísticas.

Es posible que se nos hayan escapado algunas diferencias de detalle en lo atinente a la organización cerebral de los pacientes con audición y la de los sordos que se expresan por signos. Los estudios de sujetos con lesiones cerebrales no son de una precisión absoluta: para establecer con certeza qué partes del cerebro intervienen en el lenguaje de señas, los investigadores tendrían que examinar a docenas de sordos duchos en el lenguaje gestual, que sufrieran además lesiones en los lugares deseados, y aun así tardarían decenios en descubrirlas todas. Pero la introducción de técnicas no invasivas de obtención de imágenes cerebrales —como las de resonancia magnética funcional (RMf) y la de tomografía por emisión de positrones (TEP)— han proporcionado a la ciencia nuevos instrumentos para sondear en las bases nerviosas del lenguaje.

Los investigadores se han servido de estas técnicas para investigar la función del área de Broca en la producción del habla y en la expresión por señas. Los resultados obtenidos con su ayuda han permitido ver que el área de Broca se activa en los pacientes con audición cuando hablan y, en los pacientes sordos, al expresarse por señas. Las imágenes cerebrales han confirmado, asimismo, que las regiones que intervienen en la comprensión del lenguaje de señas son en gran medida las mismas que intervienen en la comprensión del lenguaje hablado. En un estudio de 1998, los investigadores se valie-

ron de métodos de resonancia magnética funcional para observar la actividad de pacientes sordos que habían sido gestoparlantes de toda la vida, mientras éstos observaban frases en ASL reproducidas desde cintas de vídeo. Se hallaron regiones de actividad en diversas partes del lóbulo temporal izquierdo, entre ellas, ciertas partes del área de Wernicke, y en varias regiones del lóbulo frontal izquierdo, entre ellas, en el área de Broca.

En el estudio se descubrieron también regiones de actividad en los lóbulos temporal derecho y frontal derecho. Este resultado ha llevado a algunos a sugerir que la comprensión del lenguaje gestual puede tener una organización bilateral mayor que la del lenguaje hablado. Pero se ha detectado, asimismo, actividad bilateral en estudios de oyentes atentos a un discurso. Se requiere ulterior investigación para esclarecer el papel del hemisferio derecho en el procesamiento del lenguaje gestual. En cualquier caso, los estudios de lesiones cerebrales hacen ver que, si bien existen diferencias entre los lenguajes hablado y mímico, es probable que sean sutiles.

## Las enseñanzas del lenguaje gestual

En el lenguaje mímico participan tanto el procesamiento lingüístico como el visual espacial, facultades ambas que en los individuos con audición están respaldadas por sistemas neuronales en gran medida distintos. Mas, contra lo esperado, la organización nerviosa del lenguaje gestual o mímico tiene más en común con la correspondiente al lenguaje hablado que con la del procesamiento espaciovisual. ¿A qué es debido?

La respuesta sugerida por nuestra línea de investigación y el trabajo de otros reposa en la naturaleza modular del cerebro; cada módulo se encuentra organizado en torno a una tarea computacional concreta. Según esta concepción, el procesamiento de información visual espacial no se encuentra confinado en una sola región del cerebro; por el contrario, distintos módulos nerviosos procesan de modo diverso las señales visuales que el cerebro recibe. Por ejemplo, las señales visuales portadoras de información lingüística se traducirían en un formato optimizado para el procesamiento lingüístico, dando acceso al cerebro a los significados de las señas, a la extracción de las relaciones gramaticales, y así por menudo. Pero los estímulos visuales que vehiculan información de distinto tipo, como los rasgos y contornos de un dibujo, serían trasladados a un formato optimizado para, sea por caso, efectuar las órdenes motoras para la reproducción de ese dibujo. Las exigencias computacionales de estos dos tipos de tareas de procesamiento son muy diferentes; por ello, intervienen sistemas neuronales diferentes.

Desde este punto de vista, no resulta tan sorprendente que la comprensión y la producción del lenguaje de señas parezcan independientes de destrezas espaciovisuales como la reproducción de dibujos. Aunque en ambas intervienen entradas visuales y salidas manuales, se trata de tareas fundamentalmente distintas. En consecuencia, sería de esperar que hasta cierto punto compartieran sistemas cerebrales en los niveles periféricos de procesamiento —por ejemplo, en la corteza visual primaria que recibe señales del nervio óptico—, pero que divergieran en los sistemas más centrales, de rango cerebral superior.

En el caso de los lenguajes hablado y mímico la situación es justamente la contraria. Estos dos sistemas se diferencian de forma radical en sus entradas y salidas, aunque parecen implicar cómputos lingüísticos muy similares. Nosotros esperamos, en consecuencia, que los lenguajes hablado y gestual compartan gran cantidad de territorio neuronal en los niveles cerebrales más centrales y de nivel superior, y diverjan, en cambio, en los niveles de procesamiento más periféricos. En el extremo sensorial, por ejemplo, el procesamiento periférico del habla tiene lugar en la corteza auditiva de ambos hemisferios, mientras que el procesamiento inicial de los signos se produce en la corteza visual primaria. Pero, tras las primeras etapas de procesamiento, las señales parecen encaminarse hacia sistemas lingüísticos centrales que tienen una organización nerviosa común en los hablantes y en quienes se expresan por señas.

Estos hallazgos pueden resultar útiles para los neurólogos que tratan a pacientes sordos víctimas de accidentes cerebrovasculares. Para ellos, la recuperación de la facultad de expresión mímica será, probablemente, similar a la de pacientes con audición que hayan sufrido las mismas lesiones cerebrales. Además, cuando los neurocirujanos fueran a extirpar tumores cerebrales a los sordos, habrían de tomar las mismas precauciones para evitar lesiones a los centros del lenguaje que aplican con los pacientes con audición.

Uno de los principales retos que habrá de afrontar la investigación futura consistirá en determinar en qué punto concluyen las fases de procesamiento periférico y dan comienzo las de procesamiento central (e incluso, si existe una tal divisoria nítida entre unas y otras). También se requiere ulterior estudio para comprender la naturaleza de los cómputos efectuados en los distintos niveles de procesamiento lingüístico. Las semejanzas y las diferencias entre los lenguajes hablado y mímico resultan ideales para dar respuesta a estas cuestiones.

### Bibliografía complementaria

THE SIGNS OF LANGUAGE. Edward S. Klima y Ursula Bellugi. Harvard University Press, 1979. Reimpresión: 1988.

WHAT THE HANDS REVEAL ABOUT THE BRAIN. H. Poizner, Edward S. Klima y Ursula Bellugi. MIT Press, 1987. Reimpresión de Bradford Books, 1990.

THE NEURAL ORGANIZATION OF LANGUAGE: EVIDENCE FROM SIGN LANGUAGE APHASIA. G. Hickok, U. Bellugi y E. S. Klima en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 2, n.º 4, págs. 129-136; abril de 1998.

THE SIGNS OF APHASIA. G. Hickok y U. Bellugi en *Handbook of Neuropsychology*, vol. 3. Segunda edición. Dirigido por R. S. Berndt. Elsevier, 2001.

# PERFILES

Steve Mirsky

## PAUL W. EWALD: Un huésped de ideas infecciosas

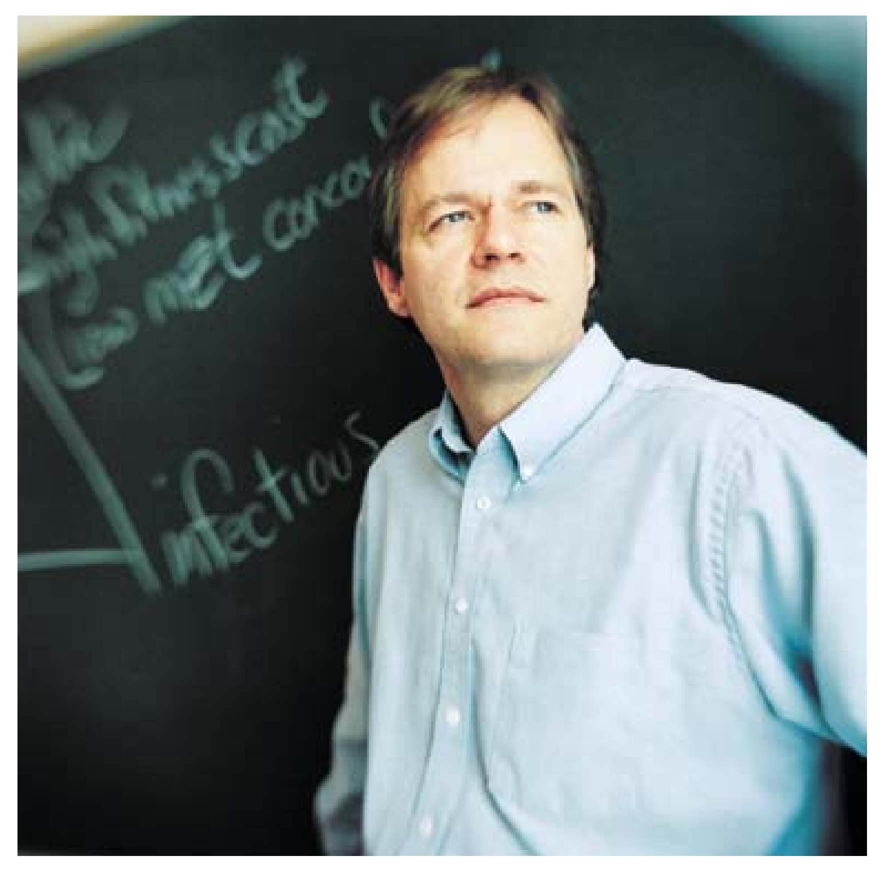
Para nuestro hombre, adelantamos, la mayoría de los cánceres, afecciones cardíacas y otras enfermedades crónicas son el resultado de una infección. De ser correcta, su teoría cambiará el curso de la medicina.

A Newton se le asocia con la caída de una manzana. Darwin cavilaba sobre los pinzones. Paul W. Ewald se inspiró en la diarrea. "Me hubiera gustado que fuera algo más romántico", confiesa este profesor de evolución en la Universidad de Amherst. Su punto biográfico de arranque no tiene desperdicio. Ewald, que —recién licenciado— estudiaba el comportamiento de los pájaros, acampaba junto a un vertedero de Kansas. Mientras libraba una batalla de tres días contra esos reveses de la fortuna, meditaba sobre las interacciones entre huésped (él mismo, en este caso) y patógeno. "Debe de haber algún organismo aquí dentro —así reflexionaba durante aquel aprieto, en 1977— y esta diarrea podría ser mi manera de librarme del organismo, aunque también podría ser la manera en la que el organismo manipula mi cuerpo, para maximizar sus posibilidades de abrirse paso hasta la siguiente víctima, contaminando, por ejemplo, el agua corriente. Si es una manipulación, con el tratamiento se evitan los trastornos. Pero si es una defensa y uno se trata, sabotea al huésped."

Las relaciones entre huésped y patógeno han dominado desde entonces los pensamientos de Ewald, plasmándose en numerosos artículos, dos libros y el respeto o el desdén de científicos y médicos, según a quién se pregunte. La admiración proviene de quienes piensan que iba magníficamente encaminado con sus primeras publicaciones, condensadas en *Evolution of Infectious Disease*, libro aparecido en 1994. "Creo que Paul Ewald ha sido un precursor en la aplicación de la teoría evolutiva a los espinosos problemas que plantea la patogénesis —comenta Stephen Morse, virólogo y epidemiólogo de la Universidad de Columbia. Su trabajo mostró, por primera vez, una manera de establecer hipótesis comprobables para estudiar cuestiones tales como la evolución de la virulencia (antaño se creía inabordable) y las causas infecciosas de las enfermedades crónicas."

Las antipatías son el resultado de su investigación más reciente, esbozada en *Plague Time*, que salió de tiros el año pasado. Ewald, a sus 47 años, sostiene en esta obra que la infección puede intervenir en el cáncer, la aterosclerosis, el Alzheimer y otras patologías crónicas ordinariamente consideradas como la consecuencia inevitable de la genética, los hábitos de conducta o la edad. "Parte de su trabajo más reciente es controvertido —afirma Morse. Personalmente prefiero reservarme mi juicio acerca de esas cuestiones, al menos hasta que se disponga de más datos."

En un artículo de 1993 Ewald echaba por tierra la vieja idea, por desgracia aún aceptada, de que los parásitos y sus huéspedes evolucionan inevitablemente hacia una




*Paul W. Ewald comenzó sociobiología pero se concentró en la medicina evolutiva; obtuvo su doctorado en zoología por la Universidad de Washington en 1980*

coexistencia pacífica. La tendencia a la benignidad está reservada a las afecciones que se transmiten directamente de una persona a otra. Alguien demasiado enfermo para mezclarse con otros constituiría de hecho un callejón sin salida para las infecciones peligrosas, pero Ewald mostró que los agentes infecciosos que utilizan vectores transmisores —así, los mosquitos del paludismo y el agua contaminada en el caso del cólera— evolucionan sin trabas adquiriendo un mayor poder destructivo. Al fin y al cabo, un mosquito puede alimentarse a placer de las víctimas más afectadas por la malaria y transmitir los peores patógenos. Más provocativa todavía era la exégesis de Ewald sobre nuestra capacidad de alentar la evolución de los patógenos a través de juiciosas medidas de salud pública. "De acuerdo con la hipótesis evolutiva, si se puede obrar de manera que los enfermos no transmitan infecciones, que sólo la gente sana pueda hacerlo, se favorecería la evolución de cepas benignas", explica.

Ewald sugiere un experimento que por razones éticas sería imposible de realizar: "Seleccione dos naciones, una con agua insalubre y otra con agua de buena calidad, e introduzca el cólera en ambas". La teoría sostiene que el agua en la que pueden medrar los microbios sirve de vector que permite que los más dañinos se perpetúen, acentuándose la virulencia. Por el contrario, si se potabiliza el agua se matarían las cepas del cólera que se sirvieran de la diarrea como medio de transporte; sólo sobrevivirían cepas más benignas porque sus huéspedes estarían lo suficientemente sanos como para transmitir el patógeno directamente a otras personas. "Poco más o menos, eso fue lo que ocurrió en 1991", señala en referencia al brote de cólera en Perú que se extendió por Iberoamérica. El y su grupo analizaron el cólera de Perú y Guatemala, cuya agua es de calidad deficiente, y de Chile, donde sucede lo contrario. Encontraron que durante los años noventa el cólera en Chile se volvió menos virulento, mientras que en los otros dos países persistían cepas altamente tóxicas. Estas ideas deberían motivar a los responsables de salud pública a garantizar el suministro de agua potable y proteger de mosquitos las viviendas.



*Ewald reflexiona sobre la interacción evolutiva entre los microorganismos y el hombre*

Dados los principios evolutivos y los datos disponibles, sostiene en *Plague Time*, los agentes infecciosos deberían considerarse al menos parte de la etiología en trastornos aparentemente no contagiosos. Cierto es que ahora la conexión entre *Helicobacter pylori* y la úlcera péptica se acepta sin discusión, aunque los manuales de medicina de hace 20 años nada decían al respecto. Las asociaciones entre infecciones y algunos cánceres (virus de hepatitis con cáncer de hígado, papilomavirus con cáncer cervical) sólo han sido aceptadas en los últimos decenios. Ewald piensa que más cánceres, quizá la mayoría, así como otras enfermedades crónicas comunes muy difundidas, acabarán por ponerse en relación con distintas infecciones; para la aterosclerosis y la enfermedad de Alzheimer, señala que algunos estudios muestran una asociación con *Chlamydia pneumoniae*. La propia esquizofrenia podría estar relacionada con la infección del protozoo *Toxoplasma gondii*.

"Se ha hecho más hincapié en la herencia y en causas ambientales no infecciosas", prosigue. "Y cuando se encuentran pruebas de que se dan esas formas de desencadenar la enfermedad, cometen un error fundamental en la ciencia: descartar una hipótesis [la infección] sólo porque se tienen pruebas de que otras hipótesis son probablemente al menos parcialmente correctas." La enfermedad, por el contrario, puede resultar de una sutil interacción entre el producto de un gen y un agente infeccioso.

Se podría aducir que la selección natural debería haberse liberado de la mayoría de los trastornos de origen genético. (Algunos, así la anemia falciforme, pasan la criba evolutiva, sin embargo: una copia del gen protege contra una enfermedad —paludismo en el caso de la anemia falciforme— de manera que el gen potencialmente letal sobrevive en una población.) Suele argumentarse que los genes que causan enfermedades tras los primeros años reproductivos no se criban. A ello responde Ewald que los ancianos han sido fuente importante de información, por lo que la evolución intenta preservarlos.

Para encontrar posibles relaciones infecciosas a enfermedades que no se dirían tales, sugiere la creación de un programa calcado del que se utiliza para registrar las reacciones adversas a las vacunas, un "sistema de información de efectos microbianos". Podría ser que los médicos de todo el mundo poseyeran una fortuna ignorada: las remisiones anecdóticas que acompañan el tratamiento antibiótico para una enfermedad concurrente. "Si se acumulan las experiencias compartidas, podrían salir a relucir causas y efectos. Sabríamos entonces si nos hallamos ante algo merecedor de un estudio controlado."

Confía en que la idea de las asociaciones entre enfermedades crónicas e infecciones vaya calando. Si algún día, aún lejano, prevalece su punto de vista, podría repetir lo que su padre pronunció en cierta ocasión. En 1993 su progenitor se recuperaba de un ataque al corazón cuando apareció el artículo antes referido de Paul; y fueron sus palabras: "Bueno, merecía la pena vivir para ver esto".

# CIENCIA Y SOCIEDAD

## Enfermedad de Darier

### *El papel del calcio*

La enfermedad de Darier, o *queratosis follicularis*, descrita en 1889 por Darier y White, es una patología genética con una forma de herencia autosómica dominante. Se transmite, pues, de generación en generación independientemente del sexo; el hijo de un individuo afectado tiene un 50 % de probabilidad de sufrir el mismo mal.

La incidencia es de 1 caso cada 55.000 y se manifiesta entre los 6 y 20 años. Se la considera un factor de riesgo de suicidio, ya que los pacientes caen en depresiones originadas por su aspecto físico y aislamiento social. Los tratamientos han resultado hasta ahora ineficaces. El calor, sudor o exposición al sol agudizan los síntomas.

La enfermedad de Darier se caracteriza por una erupción cutánea que afecta la parte central y superior del tronco, partes de la cabeza, línea del cinturón, axilas e ingles. Aunque la gravedad varía de una familia a otra, impresionan algunos casos de heridas confluentes en las piernas. Las lesiones se elevan sobre la piel a modo de placas y papilas de aspecto costroso con bordes irregulares, color marrón y embebidas en una especie de material sebáceo amarillento; además producen picor, dolor y mal olor con frecuentes infecciones secundarias. Pequeñas depresiones hundidas en las palmas de las manos y las uñas con estrías rojas y blancas y rotas son comunes. Numerosos estudios asocian la patología con retardo mental, epilepsia, esquizofrenia y cambios de estado nervioso y del humor.

Cuando se examina el tejido lesionado, se observa pérdida de adhesión celular entre los queratinocitos de la epidermis, con la desaparición consiguiente de las uniones facilitadas por los desmosomas. Por eso se atribuyó erróneamente su causa a un componente estructural de los desmosomas o alguno de los filamentos celulares intermedios.

La búsqueda del gen de la enfermedad de Darier comenzó en 1993, cuando dos grupos ingleses lo localizaron en el cromosoma 12, concretamente en la región 12q23-24.1. Más adelante, en 1998, se refinó su localización hasta un intervalo de 2,4 megabases, entre los marcadores D12S1339 y D12S2263. La falta de un gen candidato obvio endureció la búsqueda. Había que identificar genes, nuevos o conocidos, ubicados en este intervalo y estudiar si se expresaban en la epidermis. Si la respuesta era afirmativa, había que someter los genes implicados a las técnicas de identificación de mutaciones. Hasta un total de 12 genes se analizaron en un trabajo conjunto de las universidades de Oxford, Newcastle upon Tyne y Cardiff.



*Graves lesiones confluentes de la enfermedad de Darier en las piernas*

A comienzos de 1999 se encontraron las primeras mutaciones en pacientes con enfermedad de Darier en el gen denominado *ATP2A2*, que cifra la proteína SERCA2 (“sarco endoplasmic reticulum calcium atpase isoform 2”). Esta proteína, con otras dos, SERCA1 y SERCA3, forman una familia de ATPasas que actúan como bombas de calcio ($Ca^{+2}$). Localizadas en la membrana del retículo sarco/endoplasmático, bombean $Ca^{+2}$ desde el citoplasma hacia el interior del retículo, a la vez que hidrolizan ATP y mantienen de ese modo bajos los niveles de este ion en el citosol.

El procesamiento alternativo del ARN mensajero de *ATP2A2* origina dos formas de la proteína SERCA2, SERCA2a y SERCA2b, que poseen distinta afinidad por el $Ca^{+2}$ y funcionan a distinta velocidad. Ambas isoformas se diferencian en sus extremos carboxilo (los 4 aminoácidos terminales de SERCA2a son sustituidos por 49 distintos en SERCA2b) y su dispar distribución en los tejidos. La proteína SERCA2a se encuentra en el tejido cardiaco y en parte de la musculatura esquelética; SERCA2b, en la musculatura lisa y

en el resto de los tejidos no musculares, epidermis incluida.

Las mutaciones en SERCA2 se reparten a lo largo de todo el gen. Se han identificado inserciones y deleciones de un número variable de nucleótidos que destruyen la fase de lectura del ARNm, y sustituciones de nucleótidos que crean prematuros codones de fin de mensaje, cambios de aminoácidos en posiciones evolutivamente conservadas, o eliminan las secuencias de reconocimiento de la maquinaria de maduración del ARNm.

Por lo general, las mutaciones en pacientes de Darier son específicas de cada familia. Anuncian un variado espectro de defectos; entre ellos, la presumible degradación de ARNm de *ATP2A2* que contienen codones de fin de mensaje prematuros y la fabricación de moléculas mutantes de SERCA2 en las que la ausencia o alteración de importantes dominios funcionales convierte en bombas de $Ca^{+2}$ con total o parcial pérdida de función. Resulta llamativo que, pese a la presencia de SERCA2 en múltiples tejidos, el único claramente afectado sea la epidermis. Por eso se supone que deben intervenir mecanismos compensatorios en los otros tejidos.

Habrá que investigar el camino recorrido desde un defecto en una bomba de $Ca^{+2}$ hasta la pérdida de adhesión celular entre los queratinocitos. Ese tránsito pone de manifiesto la relevancia de la homeostasis del $Ca^{+2}$ en la piel. El ion, que cumple un papel esencial en cuanto segundo mensajero de multitud de señales biológicas, interviene en el control de las etapas de crecimiento y diferenciación de la epidermis. También se ha demostrado la existencia de un gradiente de concentración de $Ca^{+2}$ creciente desde las capas epidérmicas internas hasta las más superficiales. Se sabe, además, que los cultivos de queratinocitos en bajas concentraciones de $Ca^{+2}$ no forman desmosomas.

Nada tiene, pues, de sorprendente que una aberración en el control de los niveles de $Ca^{+2}$ libre en el citoplasma celular conduzca a los síntomas observados en la enfermedad de Darier. Cabe esperar que se avance en el tratamiento farmacológico capaz de restablecer los niveles normales de ese ion en los queratinocitos.

VÍCTOR LUIS RUIZ PÉREZ
Dpto. de Genética Molecular Humana
Universidad de Newcastle upon Tyne (Reino Unido)

## Fullerenos

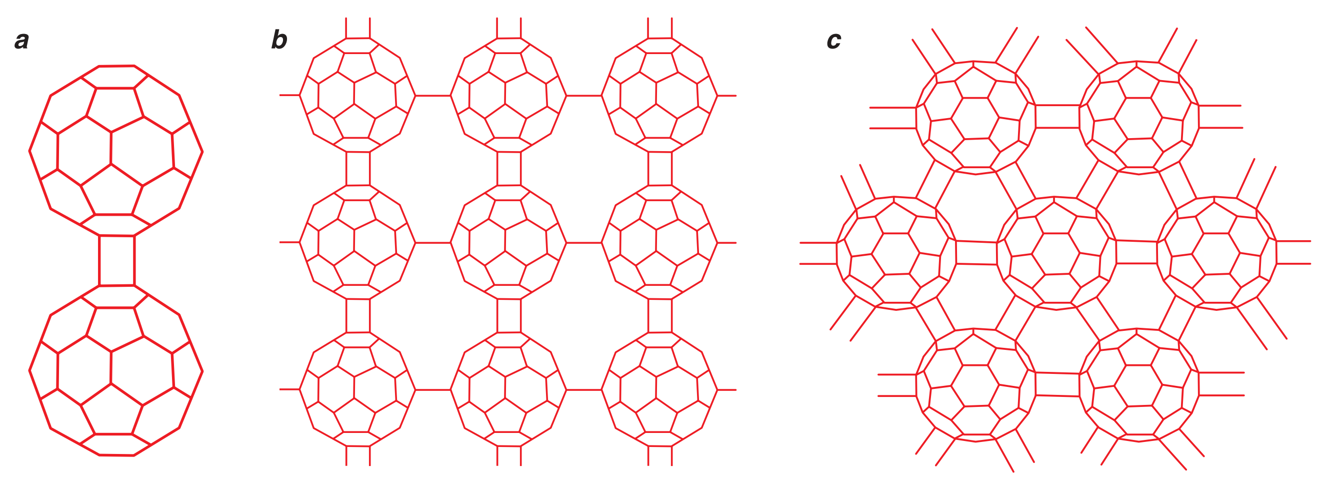
### *Polimerización*

La familia de los fullerenos, cuyo miembro más conocido es el C60, constituye la tercera forma cristalina del carbono. Las otras dos son el diamante y el grafito. Se ha estudiado mucho el C60 desde que se descubrió un método eficaz para producirlo en cantidades macroscópicas. Muy pronto se vio que la reactividad química de sus moléculas abría una de las áreas más prometedoras en la investigación de esas moléculas. En concreto, sintetizar polímeros a partir de los fullerenos con los métodos tradicionales de disolución era un reto muy atractivo.

Se comenzó a estudiar también el comportamiento del C60 bajo presión. Aunque parecía un campo distinto —la observación de sus transiciones de fase—, sería este segundo camino el que llevase a las primeras estructuras poliméricas de C60.

La primera prueba clara de que se había conseguido la polimerización del C60 vino de un equipo de la Universidad de Kentucky; la encontró en el cambio operado en el espectro Raman del C60 a temperatura ambiente. La reacción entre las moléculas de C60 venía inducida por la irradiación de la muestra con láser propia de un experimento Raman. El fotopolímero que se produjo no tenía una estructura particular, prueba de que las reacciones de polimerización ocurrieron al azar. Se había dado, a buen seguro, una cicloadición 2+2, con la conversión de enlaces dobles en moléculas adyacentes en un anillo de cuatro componentes (*véase la figura*).

Poco después, nuestro equipo y otro de los Laboratorios Bell comunicaban la obtención a presión y temperatura altas de nuevas es-




*Un dímero donde dos moléculas de C60 están enlazadas covalentemente por una cicloadición 2 + 2* (a)*, y dos polímeros C60 bidimensionales: el cuadrático* (b) *y el hexagonal* (c)

tructuras poliméricas de C60. Se sabe que los sistemas moleculares sin saturar (que contienen moléculas con enlaces dobles o triples) pueden polimerizarse a alta presión, a temperatura ambiente o a alta temperatura, y el resultado suelen ser unos polímeros amorfos. En ese proceso la presión acerca las moléculas y desestabiliza con ello los enlaces dobles o triples; mientras, la temperatura mantiene las oscilaciones moleculares que generan la orientación molecular adecuada para que se desarrolle la reacción.

En el análisis estructural por rayos X del C60 (molécula no saturada en la que se alternan los enlaces dobles y simples) sometido a presiones y temperaturas altas, se observa una disminución de la distancia entre fullerenos que concuerda con la presencia de enlaces químicos entre las moléculas. A diferencia del fotopolímero de C60, estos polímeros de C60 inducidos por la presión exhiben una estructura ordenada, prueba de que la polimerización se produce a lo largo de direcciones cristalográficas preferidas y no al azar. Se ignora cómo se nuclea y crece el polímero a lo largo de direcciones determinadas, pero parece que tiene que ver con los gradientes de presión de la síntesis.

Se han sintetizado diferentes estructuras poliméricas a distintas presiones y temperaturas. Al aplicar una presión mayor se obtuvieron polímeros unidimensionales (de cadena) y bidimensionales, con capas polimerizadas cuadráticas o hexagonales. Debe señalarse que, a temperaturas de más de 850 ºC, el C60 se transforma irreversiblemente en una fase amorfa de carbono.

## Azul de ave

### *Un color estructural*

La coloración natural de muchos tejidos biológicos se debe a la presencia de pigmentos químicos que absorben y emiten diferentes longitudes de ondas de luz. Junto a esos existen los colores estructurales, que hallan su origen en fenómenos ópticos producidos por la interacción entre la luz y estructuras de los tejidos cuyas dimensiones espaciales son de un orden de magnitud similar a las longitudes de onda de la luz visible.

No son raros los pigmentos azules en plantas e invertebrados. Pero de ellos carecen los vertebrados. La hipótesis tradicional atribuía el azul que percibimos en plumas y piel de las aves a un efecto de dispersión de Rayleigh (dispersión de la luz por partículas de tamaño mucho más pequeño que las longitudes de onda de la luz). La investigación reciente ha demostrado, sin embargo, que la coloración azul de las aves obedece a un mecanismo de interferencia constructiva.

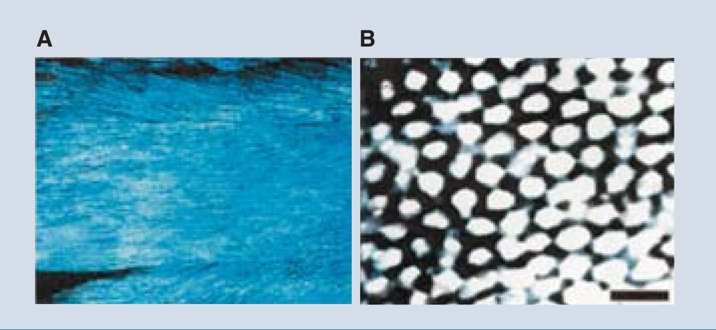
Las ondas de luz que atraviesan un tejido biológico son, en parte, dispersadas por las superficies de contacto de materiales de distinto índice de refracción y reirradiadas en todas direcciones. El modelo de dispersión de Rayleigh predice que las variaciones de índice de refracción en el tejido dispersan mejor las ondas de longitudes de onda pequeñas, produciendo colores hacia el extremo violeta del espectro visible. En este modelo, se desprecia el desfase entre las ondas dispersadas por distintas partes del tejido, desplazamiento de fase que se supone aleatorio.

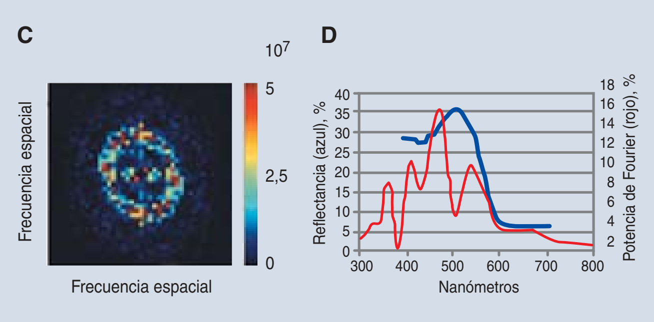
Por otro lado, en los modelos de interferencia constructiva se tiene en cuenta la simetría geométrica del material y su repercusión en el desfase entre las ondas. La posibilidad que se les ofrece a las ondas de interferir constructivamente en un medio coherente guarda relación con la periodicidad de la distribución espacial de los objetos dispersantes.

En un tejido cuasi-ordenado, las ondas desfasadas se cancelan, mientras que se refuerzan las que se hallan en fase. Estudiando la periodicidad espacial del material podemos predecir la dispersión de un número limitado de longitudes de onda. Se ha recurrido a este tipo de modelo físico para explicar la transparencia de la córnea humana. Las fibras de colágeno de las que está compuesto ese tejido son pequeñas y tan próximas entre sí, que se produce una interferencia destructiva para todas las longitudes de onda del espectro visible.

Las estructuras responsables de la coloración en los tejidos de las aves son de mayor escala que las de la córnea transparente y pueden producir interferencia constructiva para colores verdes, azules y violetas.

La figura muestra las barbas de las plumas del ave *Cotinga maynana* (*A*). La imagen de transmisión del microscopio electrónico ofrece en *B* una sección transversal de la disposición esponjosa de queratina y burbujas de aire que constituyen las barbas, observándose un ordenamiento regular a una determinada nanoescala. Para cuantificar dicho ordenamiento y relacionarlo con el modelo físico que explica la producción del color, nos servimos del análisis de



Hace poco se comprimió el C60 a presiones de más de 80.000 atmósferas, la máxima presión aplicada hasta entonces en estas investigaciones. Con una presión así, cabía esperar que se sintetizasen polímeros de C60 tridimensionales. Las mediciones de la difracción de rayos X realizadas en la Instalación Europea de Radiación de Sincrotrón en Grenoble (ESRF) revelaron que, en efecto, el C60 se transformaba en un polímero tridimensional cuando se comprimía a 130.000 atmósferas y 550 ºC. Se observó, además, un fenómeno espectacular: la presión dejaba una huella en esas fases.

La presión aplicada en la síntesis de estructuras poliméricas tridimensionales es uniaxial; la compresión resulta más intensa en una dirección determinada que en las demás. A causa de los enlaces covalentes intermoleculares que se establecen durante la compresión, la deformación se vuelve permanente. La alta simetría del C60 con 30 direcciones de enlace distribuidas de manera isótropa permite que los granos orientados al azar, con respecto a la dirección uniaxial, memoricen la presión anisotrópica usada en la síntesis. Por ejemplo, la mayor compresión aplicada en la dirección uniaxial induce la formación de enlaces más fuertes en esa dirección. Las fases poliméricas tridimensionales conservan, por tanto, la marca de esa compresión uniaxial aun después de que acabe. La muestra exhibe, en consecuencia, unos característicos patrones elípticos de difracción de rayos X de Debye-Sherrer.

Es probable que las estructuras de las fases poliméricas tridimensionales sean una red de carbonos, como el diamante, pero con grandes agujeros situados periódicamente. Se espera que la dureza de estas fases nuevas sea muy elevada, casi como la del diamante. El C60 puede transformarse directamente en éste: hay que comprimirlo a presiones no hidrostáticas de más de 200.000 atmósferas a temperatura ambiente.

LEONEL MARQUES
Departamento de Física,
Universidad de Aveiro, Portugal
J. L. HODEAU, M. NÚÑEZ-REGUEIRO
CNRS, Grenoble, Francia
M. MEZOUAR
ESRF, Grenoble, Francia

Fourier, herramienta matemática que permite la representación de una señal como una superposición de funciones ondulantes (senos y cosenos) de distintas frecuencias. Las amplitudes de las ondas que generan la señal son una medida de la presencia de pautas periódicas en la señal original.

La imagen en *B* es una señal bidimensional. Su transformada de Fourier en *C* constituye otra imagen bidimensional; puede ésta interpretarse como un código de la periodicidad o del cuasi-orden que el tejido posee en distintas direcciones. Las amplitudes relativas de la transformada de Fourier se indican en la barra de colores. Los valores mas altos de las amplitudes (*rojo*) ocurren para frecuencias específicas, que se observan claramente en la estructura de anillos de *C* e indican el cuasi-orden de *B*.

Mediante modelos físicos y matemáticos, podemos relacionar las frecuencias predominantes medidas con la frecuencia del color que el tejido dispersa de forma dominante. En *D*, se compara un promedio radial de la distribución del contenido de frecuencias en la transformada de Fourier con las mediciones del espectro de reflexión obtenido con un espectrofotómetro (instrumento que mide la intensidad de la luz reflejada por un material en distintos intervalos de longitud de onda visible).

La similitud entre los picos de color de las longitudes de onda, así como en el croma (la extensión de dichos picos), del espectro de reflexión de ambas mediciones respaldan la hipótesis de dispersión coherente causada por el cuasi-orden a nanoescala del tejido. Demuestran también que el color observado no se debe al fenómeno de Rayleigh, pues se presentaría como una curva creciente hacia el extremo violeta del espectro.

Esas mismas técnicas de análisis pueden aplicarse al estudio de colores estructurales de tejidos biológicos muy diversos con estructuras laminares y cristalinas.

La comprensión de la física de los colores estructurales constituye un paso crítico en la investigación de la función y evolución de la coloración de los organismos. Es probable que las nanoestructuras de los tejidos coloreados de las aves hayan evolucionado por selección sexual.

Obviamente, la preferencia de color por las hembras de una especie atañe al color observado (frecuencia), no a la nanoestructura del tejido (periodicidad espacial). La transformación de Fourier cuantifica las estructuras geométricas, no en función de las propiedades de orden espacial de los tejidos, sino a través de un análisis de las frecuencias. De esta forma, la transformación de Fourier provee un paralelismo natural con el mecanismo de selección de color y ayuda a entender el papel que desempeña la coloración azul en la trayectoria evolutiva de las aves.

RICHARD O. PRUM
Dpto. de Ecología y Biología Evolutiva, Universidad de Kansas
RODOLFO H. TORRES
Dpto. de Matemáticas,
Universidad de Kansas

## Aves gigantes voladoras

### *Mioceno de Sudamérica*

El cóndor representa hoy el límite superior de tamaño para un ave voladora. Hubo, en el pasado, notables excepciones. Así, *Argentavis magnificens*. Con una masa corporal de 80 kilogramos, siete metros de envergadura y plumas en las alas de un metro de longitud, esta ave pudo haber sido la mayor que surcara los cielos. Conocida por fósiles con unos seis millones de años del Mioceno superior de Argentina, estaba emparentada con los teratornítidos, grupo bien representado en las trampas de asfalto de Rancho La Brea, en California.

La aplicación de ciertos principios aerodinámicos ha permitido obtener información de interés so-

bre la capacidad y estilo de vuelo de *Argentavis*. Para efectuar el despegue necesitaría una velocidad mínima de 40 km/h, valor muy alto para un ave cuyas extremidades posteriores no se encontraban bien preparadas para la carrera. Pero la velocidad que cuenta es en relación a la del aire; y nada impide que la alcanzara avanzando con las alas desplegadas contra el viento. De hecho, las condiciones climáticas de la región pampeana eran bastante propicias, al ser la cordillera de los Andes más baja que en la actualidad, por lo que no desviaría la trayectoria de los vientos provenientes del Pacífico.



*Reconstrucción del ave gigante* Argentavis magnificens*, del Mioceno superior de Argentina, intimidando a dos marsupiales con dientes de sable para arrebatarles su presa (cleptoparasitismo). Ilustración realizada por Manuel López Cuevas*

El vuelo batido representa otro problema. Consumidor de mucha energía en las aves grandes, resultaría más económico el planeo y recuperar la altura perdida aprovechando las corrientes térmicas de aire ascendente. Además, con vientos fuertes y continuos desde el oeste, al ascender se desplazaría hacia el este. ¿Cómo volaría en sentido contrario? Planear contra el viento implica perder altura rápidamente.

Los cóndores, cuya carga alar es reducida, vuelan lentamente en círculos para mantenerse dentro de las térmicas o maniobrar cerca de las montañas. *Argentavis* tenía una carga alar ligeramente mayor, pero muy baja para su tamaño, por lo que no podría haberse enfrentado contra vientos fuertes; la situación mejoraría, en cambio, si podía aumentarla algo, lo que tal vez consiguiera al comer en tierra.

¿Qué territorio de alimentación defendería un ave del porte de *Argentavis*? La superficie diaria de terreno prospectada por las rapaces en busca de presas guarda relación con su tamaño corporal; usando la ecuación apropiada se infieren 540 km$^2$ para *Argentavis*. Las águilas planean a una altura característica de 60-120 m, manteniendo una velocidad de crucero de 30-50 km/h, lo que les permite visualizar una superficie lateral de 250 m; ello implica efectuar cuatro pasadas para barrer cada km$^2$ del territorio, lo que en el caso de nuestra ave fósil se traduciría en la necesidad de recorrer cada día una distancia lineal de 2160 km.

La velocidad de planeo alcanzaría los 70 km/h en *Argentavis*. En 12 horas de vuelo diario podría recorrer unos 840 km. Tardaría tres días para prospectar la totalidad de su territorio, lo que obliga a descartar que fuese un ave de presa cazadora activa. Debía tratarse, pues, de un buitre poderoso, que recorren superficies menores al recurrir a la carroña; además, su altura de vuelo es mayor, entre 200 m y más de un kilómetro, ya que localizan los cadáveres guiándose por el movimiento de aves menores.

Los requerimientos alimentarios de *Argentavis* eran bastante elevados. A tenor de lo observado en rapaces mantenidas en cautividad se estima el consumo del fósil pampeano en 2,5 kg de carne por día. Ahora bien, este dato se refiere al metabolismo basal, que representa entre el 25 y el 50 % de la demanda en condiciones de actividad; la exigencia se incrementaría hasta un total de 5 a 10 kg diarios.

¿Qué condiciones se daban en el Mioceno de Sudamérica para permitir la evolución de tamaño gigante carroñero? La diferencia principal con el marco ecológico moderno es la presencia de un carnívoro con dientes de sable, el marsupial *Achlysictis*, de tamaño similar al del puma. En función de su anatomía, este depredador podría abatir grandes herbívoros, comiendo vísceras y los paquetes musculares más delicados, con lo que dejaría cantidad abundante de carroña para los necrófagos; dado su imponente porte, *Argentavis* podría incluso haber arrebatado a estos marsupiales sus presas.

Finalmente, la dinámica reproductiva inferida para estas aves resulta también harto singular. Así, su tamaño de puesta anual se ha cifrado en 0,78 huevos, lo que indica que criarían cada par de años. El huevo, incubado durante 64 días, pesaría 1052 gramos; el pollo permanecería en el nido 230 días y alrededor de 190 más en sus inmediaciones. Se completaría el desarrollo con la adquisición del plumaje adulto, a los 12 años y medio. Todo ello apunta a una población con efectivos reducidos y de renovación temporal muy lenta. Desde esta perspectiva, la evolución de *Argentavis* fue un acontecimiento único, posibilitado por las excepcionales condiciones ecológicas reinantes durante el Mioceno en la región pampeana.

PAUL PALMQVIST,
Depto. Ecología y Geología,
Universidad de Málaga

SERGIO F. VIZCAÍNO,
Depto. Paleontología de Vertebrados, Museo de La Plata (Argentina)

RICHARD A. FARIÑA,
Depto. Paleontología,
Universidad de la República
(Montevideo, Uruguay)

# Explorador Ultravioleta Internacional

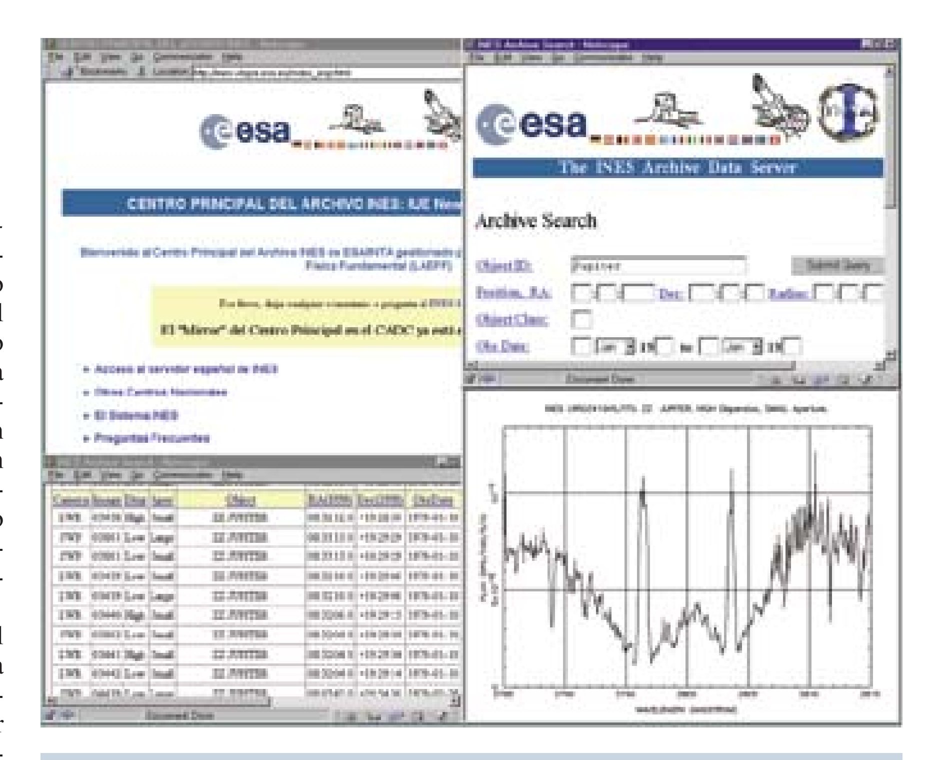
## *El Archivo IUE en España*

El *Explorador Ultravioleta Internacional* (IUE), primer observatorio espacial, fue un proyecto conjunto de la Agencia Espacial Europea (ESA), la NASA y el Reino Unido. Marcó el principio de la astronomía ultravioleta. Otros satélites habían ya mostrado el gran interés y la valiosa información que podía obtenerse de la radiación UV, pero hasta el IUE no hubo un verdadero observatorio accesible para toda la comunidad astronómica.

Lanzado en enero de 1978, el IUE permaneció operativo hasta septiembre de 1996. Las operaciones eran llevadas a cabo por un equipo de 50 astrónomos e ingenieros desde la Estación de Seguimiento de Satélites de la ESA en Villafranca, cerca de Madrid, y desde el Centro de Vuelo Espacial Goddard de la NASA, en Maryland. Durante los casi 20 años de vida del proyecto, más de 2000 investigadores hicieron observaciones teniendo la posibilidad, rara en las misiones espaciales, de reaccionar rápidamente ante eventos astronómicos imprevisibles y cambiar los planes de observación según fuera necesario.

El IUE tomó más de 110.000 espectros de 11.000 objetos astronómicos. Esta ingente cantidad de datos ha dado lugar a más de 3600 artículos en las revistas profesionales de astronomía y astrofísica, así como a más de 500 tesis doctorales en todo el mundo.

Una de las razones de la productividad y el éxito de la misión estriba en que los datos del IUE han estado a disposición de los astrónomos unos pocos meses después de ser obtenidos, gracias al Archivo IUE, el primer archivo de datos astronómicos accesible en línea, mucho antes de que la Red (World Wide Web) existiera. Estos datos de archivo, utilizados desde los primeros tiempos del proyecto, han permitido que cada espectro UV observado con el IUE haya sido usado por la comunidad astronómica mundial una media de seis veces.




## Características del Proyecto IUE

| | |
|---|---|
| VIDA EN ORBITA: | 18,7 años, sin interrupción hasta septiembre de 1996 |
| ORBITA: | Geosíncrona, 32.000 km × 52.000 km |
| OPERACIONES: | Dos observatorios (VILSPA en España; GSFC en EE.UU.) |
| TELESCOPIO: | 45 cm, f/15 Ritchey-Chretien Cassegrain |
| LANZAMIENTO: | 26 de enero de 1978 con un cohete Delta desde Cabo Cañaveral (671 kg) |
| INSTRUMENTOS CIENTIFICOS: | 2 espectrógrafos para el UV; dispositivo de imagen óptica; 2 resoluciones: 18 km/s y 800 km/s |
| DATOS RECOGIDOS: | 110.033 espectros de 11.054 objetos diferentes con un rango de brillo de diez mil millones, incluyendo cometas, planetas, estrellas, galaxias y cuásares |
| CARACTERISTICAS ESPECIALES DE LA MISION: | Funcionamiento similar a los observatorios en tierra<br>Tiempo de respuesta para fenómenos especiales muy corto (1 hora) |
| USO DE LOS DATOS: | Cada hora se continúan extrayendo 5 espectros del archivo, 3655 artículos en la bibliografía profesional han usado datos de IUE; más de 500 tesis doctorales han usado datos de IUE |

El día 21 de marzo de 2000, la Agencia Espacial Europea hizo entrega oficial a la comunidad científica internacional del archivo de datos de IUE, completando así su actuación en este proyecto. Los datos de la misión y el sistema de acceso a ellos a través de Internet, conocido como INES, quedan así a disposición de los científicos, y bajo el control y responsabilidad de los mismos.

A partir de ahora, el sistema INES tendrá su centro principal en el Laboratorio de Astrofísica y Física Fundamental (LAEFF) del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). El LAEFF será el responsable final de la gestión del archivo y del sistema de distribución, y actuará como coordinador de los centros nacionales de INES que existen en la actualidad en 22 instituciones científicas de todo el mundo.

Los datos de INES pueden utilizarse directamente sin un conocimiento previo profundo de la misión IUE, ya que están completamente procesados y calibrados. Esto facilita su uso, ya sea

por el astrónomo profesional, por el estudiante universitario o por cualquier persona con unos mínimos conocimientos de física. Para acceder al sistema basta con poner en marcha el navegador del ordenador y conectar con http://ines.vilspa.esa.es.

El sistema es de acceso libre, y una vez dentro de él, el usuario busca los datos que le interesan (por ejemplo, a partir del nombre del objeto), puede visualizarlos y obtener toda la información necesaria sobre la observación y puede transferir los datos a su ordenador para un estudio detallado. La gran cantidad y variedad de objetos observados y la facilidad de uso de este archivo hacen que sea una herramienta nueva y única para la investigación y el aprendizaje de la astrofísica.

El LAEFF (http://laeff.esa.es) es un laboratorio del INTA encuadrado en la División de Ciencias del Espacio, que fue creado en 1991 y está situado en la Estación de Seguimiento de Satélites de la ESA en Villafranca del Castillo. Ha colaborado con la ESA en el desarrollo y puesta en marcha del sistema INES y, desde julio de 2000, es el responsable único del funcionamiento y mejora del mismo, añadiendo así una nueva actividad a sus líneas de trabajo: los bancos de datos astronómicos.

Equipo INES
LAEFF/INTA

## Amazonía peruana

### *El efecto sumidero*

Pese a su función clave en el mantenimiento de la vida en el planeta, no tenemos resultados claros del intercambio de carbono en la Amazonía. De ahí la importancia de los trabajos regionales o los enfoques parciales, que permitan algún día elaborar una estadística global. Conviene para ello partir del concepto de parcelas de muestreo, establecido en ecología para estimar el balance de carbono de un bosque.

Hay en Perú unas 50 parcelas permanentes de árboles de 1 a 2,5 hectáreas de extensión, la mayoría establecidas en la selva baja amazónica, especialmente en Madre de Dios, Cuzco y Loreto. Las parcelas se concentran en zonas protegidas (Parque Nacional del Manu) y en pequeñas zonas reservadas por las compañías de ecoturismo.

Conocemos ya bastante bien la rica biodiversidad vegetal de la Amazonía y la región andina, que ocupan el 70 % de todo el país. Importa dar un paso más y demostrar que Perú y otros estados amazónicos pueden aportar al mundo un gran servicio ambiental, a través de la absorción del carbono por sus bosques maduros.

Se llama área basal del bosque a la sección del área de árboles por unidad de área suelo. En los bosques tropicales se emplea ese criterio en vez del concepto de biomasa total, por cuanto los cambios promovidos por el crecimiento de los árboles y la mortalidad proveen una efectiva medida de los cambios de biomasa.

En nuestra investigación hemos abordado los cambios registrados en la biomasa de los bosques maduros de tres regiones: los trópicos húmedos (153 parcelas), bosques húmedos neotropicales (120 parcelas) y la Amazonía (97 parcelas). Se han llevado a cabo más de 600.000 medidas individuales de árboles.

Sometimos luego la información disponible a un doble análisis. De cada región, calculamos el promedio de cambio operado en el área basal general a partir de la diferencia entre los censos iniciales y los finales de cada lugar geográfico. Los lugares geográficos pueden contener una o varias parcelas con similares datos florísticos o edáficos. En el segundo análisis estimamos el cambio operado en el área basal en función del calendario anual a partir de la acumulación neta regional de biomasa a través del tiempo.

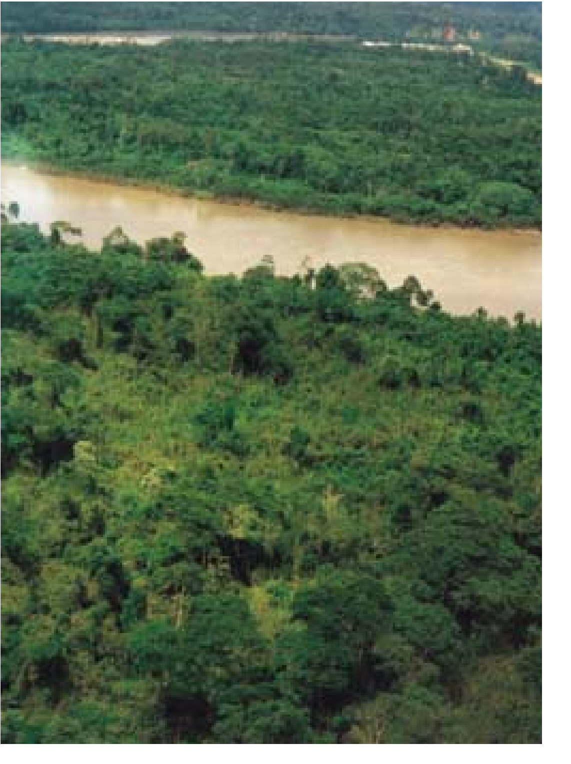
De acuerdo con nuestros resultados, la biomasa creció en los bosques maduros de los Neotrópicos húmedos a razón de una tonelada por hectárea y año; poco menos en la Amazonía. A su vez, los datos pantropicales revelan también un incremento en la biomasa, algo inferior al observado en la Amazonía, pero por encima de la media tonelada por hectárea y año. Pese a la variación en la cuantía del cambio, la mayoría de los bosques tropicales estudiados revelan un incremento en su biomasa. La diferencia entre los bosques neotropicales y los paleotropicales puede reflejar factores climáticos distintos, amén de una mayor perturbación antropogénica.

Nuestros datos incorporan la variación natural en los bosques de la Amazonía, que va de los abundantes bosques de tierra firme hasta los bosques aluviales, los bosques de suelo de arena blanca y bosques de ciénaga. Y no hemos dejado de considerar los aspectos que pudieran inducir un sesgo en el trabajo, a saber, la incidencia perturbadora de los investigadores en los árboles, la elección adecuada de las manchas boscosas y el crecimiento marginal de las parcelas.

Cuantificadas todas esas posibilidades e introducidas en el modelo, hemos llegado a la conclusión de que la biomasa de los bosques neotropicales se ha incrementado desde 1970, con su beneficioso impacto en la ecología y en el cambio global del carbono. Conclusión que parece poner en aprietos al viejo postulado ecológico según el cual la biomasa de los ecosistemas maduros debería aproximarse al equilibrio.

¿Cómo explicar esa paradoja? Por varias razones. En primer lugar, se trata de una respuesta natural a las variaciones cíclicas climáticas; podría deberse también ese incremento de masa a la recuperación de perturbaciones del pasado, y en tercer lugar a una mejora en la productividad del bosque debido a un cambio climático o un incremento en la disponibilidad de nutrientes como el $CO_2$, N o P.

El clima de la Tierra no permanece estático, ni, por tanto, la respuesta a largo plazo del bosque. Pensemos en los episodios de El Niño, una oscilación oceánica del sur. Cuando se produce esa corriente, la Amazonía, en su globalidad, recibe una lluvia por debajo de lo normal, pero algunas



*Bosque amazónico de Camisea, Bajo Urubamba. En esta zona hay más de 1500 especies de árboles diferentes y sus paisajes tienen coberturas de* Guadua sarcocarpa *subsp.* sarcocarpa (Graminae)*, un bambú con frutos comestibles*

partes de la Amazonía registran una pluviosidad por encima de la media. Eso no obstante, de acuerdo con nuestros datos los bosques amazónicos ganaron biomasa antes, durante y después del intenso Niño de 1982-83.

Se ha observado, asimismo, que la productividad de los bosques tropicales y templados crece y los ecosistemas maduros ganan biomasa si se estimula su rendimiento. Ocurre a buen seguro con el incremento en la concentración atmosférica del $CO_2$, gas que necesitan las plantas para crecer.

Cualquiera que sea la causa, el incremento de biomasa de los bosques neotropicales representa un reservorio importante del ciclo del carbono. Para calcular el tamaño de ese efecto sumidero, convertimos la biomasa aérea en reservas de carbono usando datos alométricos obtenidos en la Amazonía central. De acuerdo con los mismos, el 48 % de la biomasa se halla en forma de carbono. (Las raíces contenían cerca al 25 % del total de la biomasa del bosque.) Estimamos que el incremento total en la biomasa de las parcelas amazónicas era equivalente a una ganancia neta de 0,61 toneladas de carbono por hectárea y año. Si multiplicamos ese valor por el área de un bosque húmedo de la Amazonía (7,18 millones $km^2$) resultará que la biomasa de un bosque maduro y su carbono acumulado será de 440 millones de toneladas de carbono anuales.

El bosque amazónico primario ocupa en Perú unos 620.000 km cuadrados. Da cuenta, pues, de cerca de 38.000.000 toneladas de carbono anuales. Aunque se trata de una cantidad pequeña en términos globales, quintuplica el $CO_2$ nacional emitido por quema de combustible fósil.

Los bosques amazónicos desempeñan una función tampón ante el incremento del $CO_2$ atmosférico. Amortiguan el impacto del cambio climático derivado de la subida de temperatura que sería aún más intenso sin la ayuda de los bosques amazónicos. Ello significa que los bosques tropicales contribuyen no sólo al bienestar del Perú, sino también del mundo entero.

Pero el efecto sumidero de los bosques maduros no está garantizado para siempre. Pudiera darse una cota superior en la capacidad de crecimiento de la biomasa del bosque. Además, la deforestación para agricultura, la tala de árboles con fines madereros, las fragmentaciones y los cambios climáticos pueden modificar e incluso menguar la acumulación retenida por los bosques maduros. Si queremos respetar el papel que cumplen los bosques tropicales en el ciclo global del carbono, no quedará otro remedio que mantener extensas parcelas con biomasa protegida.

Las parcelas peruanas han dado la voz de alarma, como las sumamente importantes de Tambopata en Madre de Dios, que quedan fuera del Parque Nacional Bahuaja Sonene. Resulta apremiante proteger esos lugares para continuar vigilando la acumulación de carbono.

MARIO PERCY NÚÑEZ VARGAS
OLIVER L. PHILLIPS
RODOLFO VASQUEZ M.
YADVINDER MALHI

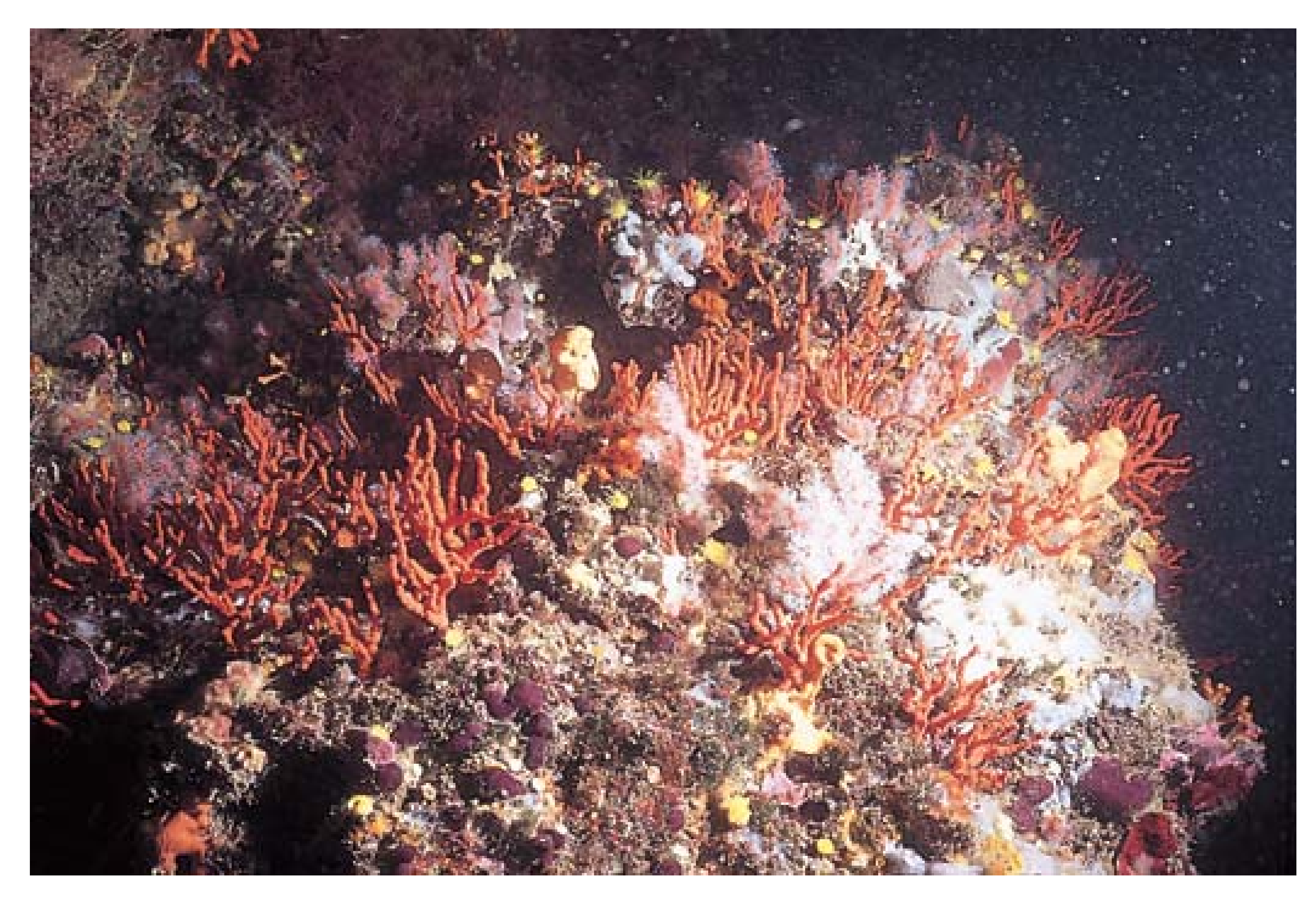
# De cerca

Texto y fotos: Josep-Maria Gili y David Díaz

## El coral rojo

El coral rojo del Mediterráneo ha sido objeto de la codicia humana desde la antigüedad clásica, que le atribuía propiedades curativas y afrodisíacas, amén de considerarlo talismán de buena fortuna. Su actual utilización más prosaica como empaste dentario o consolidación de huesos ha renovado el interés por la especie. Cierto es que nunca perdió su predicamento en joyería. Si en el siglo XX ornaba los tesoros de la realeza, hoy la elevada cotización que el coral alcanza en los mercados internacionales, recurso natural cada día más escaso por su excesiva explotación, atrae sustanciosas inversiones de los países ricos.

*Corallium rubrum* es una gorgonia que se distingue por su eje calcáreo; en las demás es córneo. Sus ramas dendriformes se fijan fuertemente al substrato rocoso. De las ramas surgen los pólipos blanquecinos, que se extienden hasta medio centímetro de longitud. Se trata de una especie mediterránea, aunque se ha recolectado en algunas ocasiones en el Atlántico cerca del estrecho de Gibraltar. Acostumbra formar poblaciones densas, de más de 40 colonias por metro cuadrado, en lugares poco iluminados, desde 15 a unos 200 metros de profundidad. Crece poco a poco, a razón de uno a dos milímetros por año. Las colonias de 20 centímetros tienen, pues, un siglo de edad.



*1. Fondos de coral rojo a más de 50 m de profundidad. Las colonias crecen hacia arriba, en sentido opuesto a las que se desarrollan en cuevas y grietas submarinas a menor profundidad. Evita siempre la excesiva sedimentación; por eso medra en fondos rocosos, alejados de los aportes sedimentarios de los ríos*



*2. Colonia de coral rojo con todos los pólipos abiertos y desplegados. Los pólipos se alimentan de partículas y organismos del plancton transportados por las corrientes. Es, pues, una especie carnívora, que crece allí donde las corrientes arrastran las presas hasta la cercanía de sus colonias*



*3. Población de coral rojo de una pequeña cavidad rocosa a unos 25 m de profundidad. En estas oquedades, muy frecuentes en el litoral mediterráneo, el coral crece hacia abajo evitando la excesiva iluminación y sedimentación*



*4. Visión de cerca de los pólipos de coral rojo. Cada pólipo produce de 3 a 6 huevos, que una vez fecundados dan lugar a una larva. Las colonias presentan sexos separados. Las larvas se asientan próximas a las colonias progenitoras, conformando los densos bancos que recuerdan los árboles de un bosque*

# Mecanismo de acción de los interferones

*Consideradas un artefacto en un comienzo, estas citoquinas descubiertas en 1957 se aplican al tratamiento de múltiples enfermedades. ¿Cuál es su mecanismo de acción?*

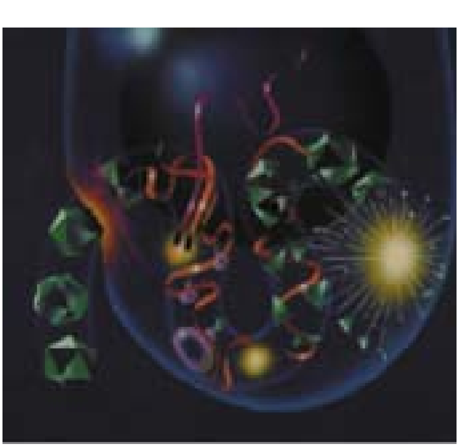
Jesús Gil y Mariano Esteban

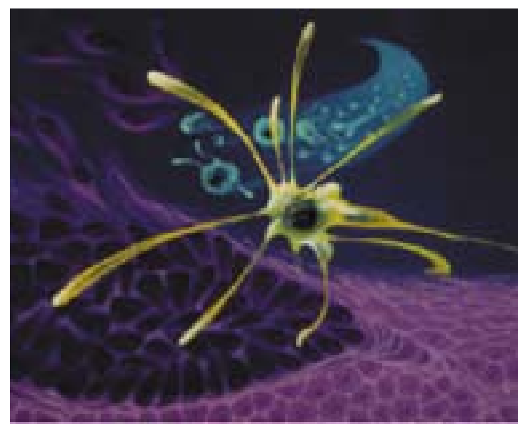
Los interferones constituyen el ejemplo más representativo de productos biológicos sintetizados por el organismo en cantidades muy pequeñas, pero con propiedades importantes. Actúan en primera línea de defensa contra infecciones víricas y parasitarias. Estas proteínas han abierto las puertas al campo de la biotecnología.

El trabajo desarrollado con tales moléculas, dado su interés sanitario, ha servido de referencia sobre la rentabilidad práctica de la investigación básica. Hoy en día, los interferones son el segundo producto biotecnológico más vendido en el mundo. En 1999, se fabricaron tres kilogramos, valorados en 4000 millones de dólares, para el tratamiento de cánceres, infecciones víricas y enfermedades neurodegenerativas.

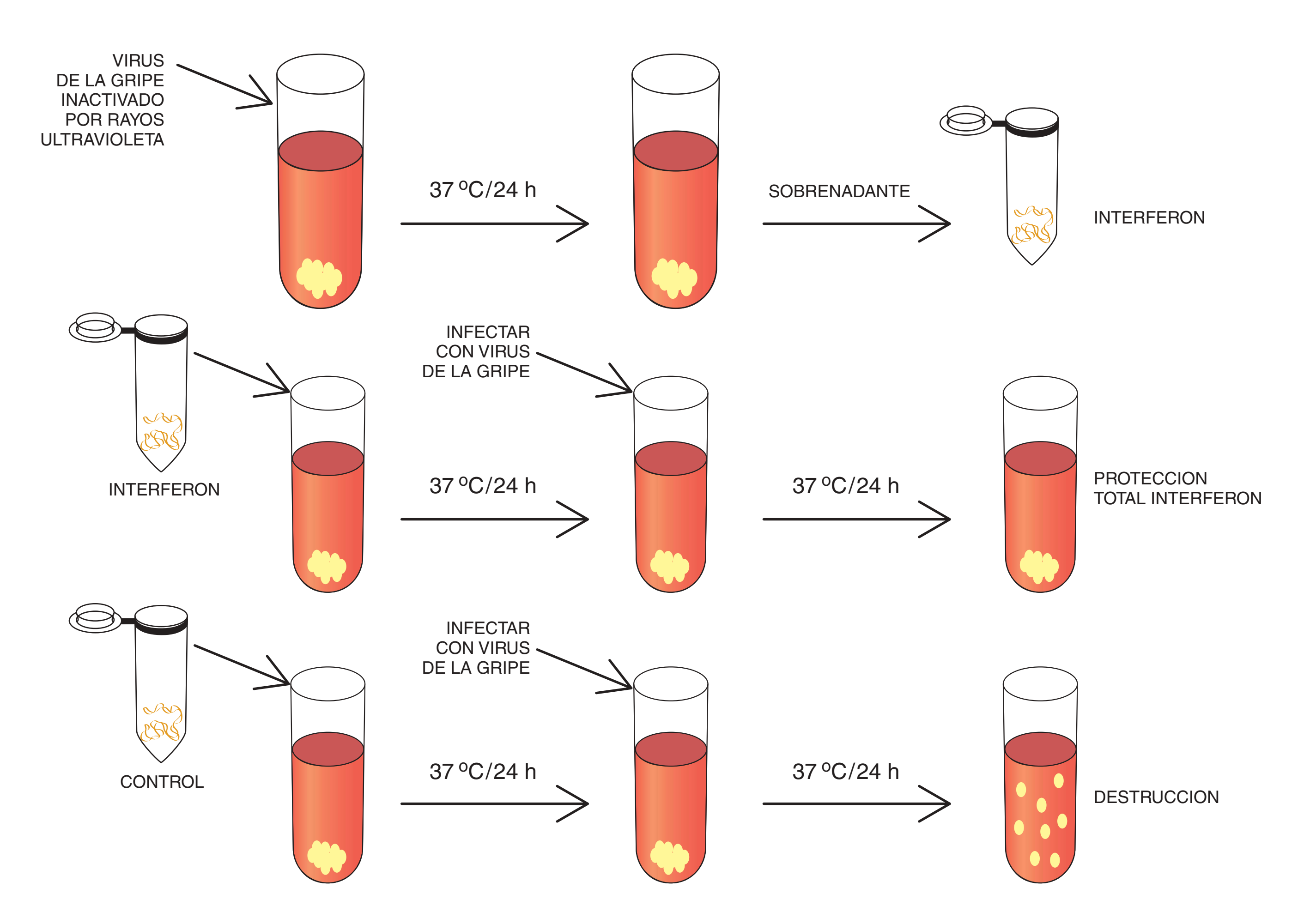
La verdad es que los interferones han sido el motor para que la industria farmacéutica se interesara por la biotecnología, con lo que ello ha supuesto de cambio en el concepto tradicional de escalado y purificación de compuestos biológicos. Han revolucionado, además, la medicina hospitalaria, ya que al ser una de las primeras sustancias naturales obtenidas por ingeniería genética, su administración en pacientes ha permitido establecer procedimientos de control y seguimiento, así como de obtención de datos farmacológicos, posteriormente aplicados a otros productos orgánicos.

Pero, ¿qué son los interferones? La historia próxima de su noción comienza en 1957, con el descubrimiento de cierta sustancia protectora contra los virus por Alick Isaacs y Jean Lindenman, del Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Londres (NIMR). Como la mayoría de los descubrimientos, éste nació de observaciones rigurosas y de la intuición de los investigadores para percatarse de la importancia de sus observaciones. El experimento inicial fue sencillo. Incubaron células de embrión de pollo durante 24 horas en un medio de cultivo con virus de la gripe, previamente inactivado por radiación ultravioleta. Observaron que se liberaba de las células, al medio de cultivo, cierto producto; éste, cuando se añadía a células frescas procedentes de embriones de pollo, impedía ("interfería") la replicación de la estirpe salvaje y lítica del virus de la gripe. Es decir, las células así tratadas quedaban totalmente protegidas contra la infección por el virus gripal. Debido a que el principio activo "interfería" (impedía) la replicación vírica, se le bautizó con el nombre de *interferón*.





**1. LAS ACCIONES BIOLOGICAS ejercidas por los interferones no se limitan a su capacidad antivírica *(izquierda)*, sino que modulan además la acción del sistema inmunitario (*centro*) y ejercen efectos antiproliferativos (*derecha*).**




**2. ALICK ISAACS Y JEAN LINDENMAN descubrieron en 1957 que las células tratadas con virus de la gripe inactivado secretaban una sustancia al medio extracelular (bautizada como interferón) con capacidad de proteger contra infecciones víricas.**

La comunidad científica internacional comenzó a interesarse por la nueva molécula. Se vio que su actividad biológica trascendía la función antivírica para ejercer también efectos antitumorales y reguladores del sistema inmunitario.

Con el tiempo se halló que no se trataba de una sola proteína. Había un conjunto de genes que codificaban distintos interferones. Podemos reducirlos a dos clases principales: el interferón de tipo I (alfa y beta) y el de tipo II (gamma). El interferón de tipo I lo producen los fibroblastos y células leucocitarias en respuesta a infecciones víricas, inducidos por la síntesis de ARN bicatenario como intermediario en la replicación vírica. El interferón de tipo II lo fabrican los linfocitos en respuesta a mitógenos.

Dentro del interferón de tipo I hay, a su vez, dos clases: el interferón-α, que procede de una familia multigénica, y el interferón-β, que está codificado por un solo gen. En el tipo II, el interferón-γ también está codificado por un solo gen. Esta diversidad de interferones añade complejidad a sus acciones finales y a los mecanismos involucrados en los procesos.

Durante los años setenta emerge la nueva genética molecular, al descubrirse las enzimas de restricción y al demostrar Herbert W. Boyer y Stanley Cohen que las bacterias podían servir de factorías para fabricar proteínas de interés, como la insulina y la somatostatina. En 1980, el grupo de C. Weissmann, de Zurich, clonaba el primer gen de interferón en la enterobacteria *Escherichia coli*. De inmediato hay un salto espectacular en el sector farmacéutico que, al poder disponer del interferón en cantidad, puede pensar en aplicarlo como agente terapéutico contra virus y tumores.

La disponibilidad de la proteína en estado puro y el interés por conocer su mecanismo de acción alentaron los pasos siguientes: desentrañar la estructura de la proteína, conocer su interacción con la membrana celular e identificar las señales intracelulares emitidas.

Para desvelar la estructura se recurre al análisis de difracción de rayos X. Se supo así que los interferones son proteínas que se asocian consigo mismas para formar dímeros, con unos dominios específicos que le podrían servir para interaccionar con el receptor. Posteriormente, gracias a la clonación de los receptores de interferones de tipo I y II, se demostró que tales receptores eran proteínas integrales de membrana de tipo I (atraviesan una vez la membrana plasmática). Los receptores constan de una parte extracelular, im-

plicada en la unión a los interferones, una parte transmembrana y una parte intracelular, necesaria esta última para transmitir a la célula distintas señales.

Había que identificar el mecanismo de acción de los interferones. ¿Cómo pueden unos factores solubles ejercer acciones tan dispares y, a la vez, tan específicas? Aunque se ha avanzado bastante en la respuesta, persisten muchos cabos sueltos. Fruto del empeño investigador, conocemos las cascadas de señalización que llegan desde la membrana de la célula y terminan en la inducción de múltiples genes del núcleo. De forma elegante, el grupo de G. R. Stark, Pellegrini y Ian Kerr, de la Fundación Imperial de Investigaciones Oncológicas de Londres, y el de James A. Darnell, del neoyorquino Instituto Rockefeller, consiguieron, a finales de los años ochenta, descifrar los procesos moleculares mediante los cuales los interferones, tras unirse al receptor, activan la transcripción de genes específicos, genes que determinan su propia funcionalidad.

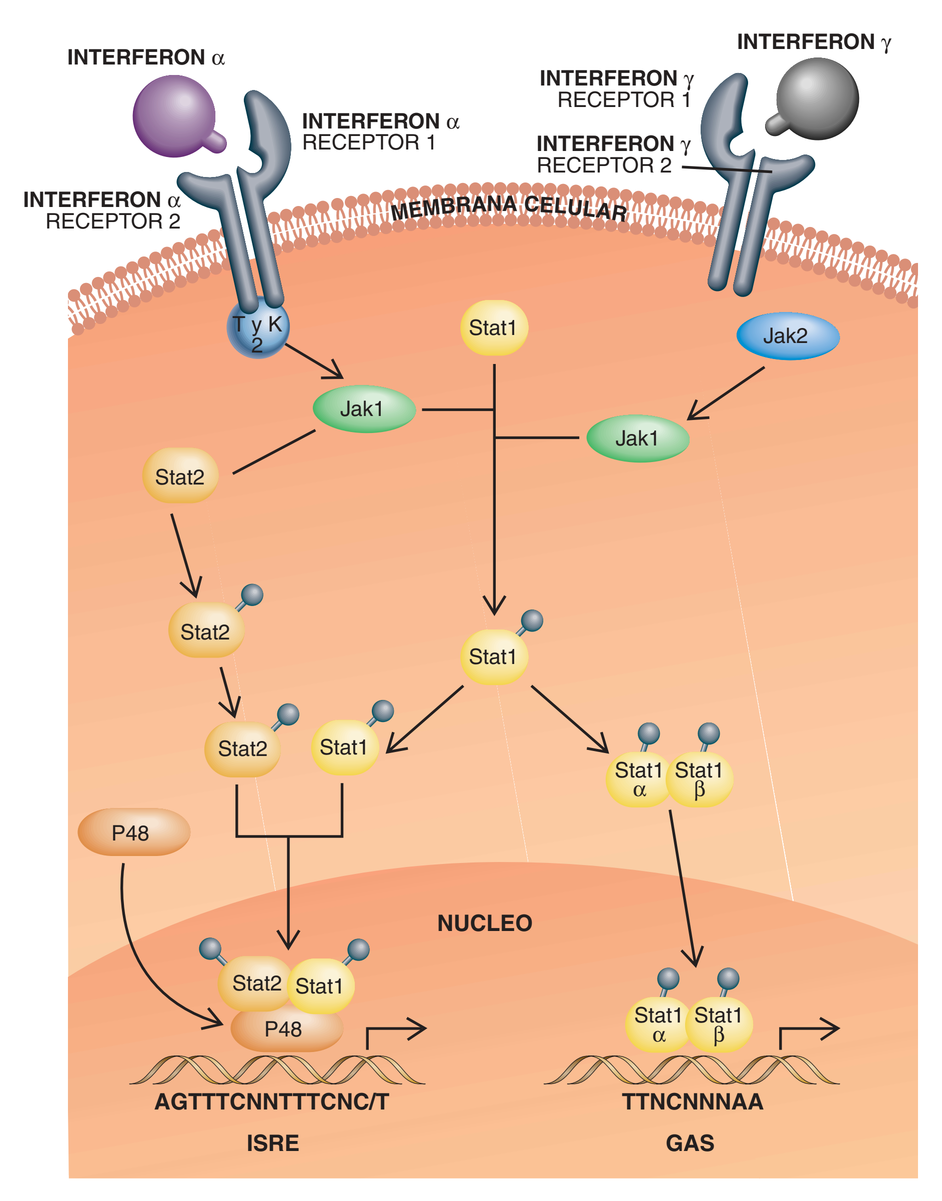
Conocemos ya los mecanismos, ligeramente distintos, empleados por los interferones de tipo I y de tipo II. La señalización inducida por el tipo I consta de varios pasos. En una primera etapa, la llegada de interferón-α o de interferón-β provoca la heterodimerización del receptor. Ese proceso desencadena una cascada de fosforilaciones en tirosinas, en la que intervienen diversas proteínas mediadoras (TYK2, JAK1, STAT1 y STAT2).

En virtud de la fosforilación, las proteínas STAT1 y STAT2, pueden formar dímeros y, con esa forma, alcanzar el núcleo. Instalado en el núcleo, el dímero constituido por ambas proteínas STAT se comporta como un factor de transcripción específico de secuencia, estimulando la expresión de un conjunto de genes.

El proceso difiere un poco en respuesta a interferón-γ. Las dos subunidades de los receptores de interferón-γ se encuentran separadas; una subunidad interacciona con JAK1 y la otra con JAK2, dos quinasas de tirosinas. La llegada del interferón-γ a las células induce la dimerización de dímeros de cada una de las subunidades del receptor. Esto posibilita que JAK1 y JAK2 se encuentren lo suficientemente cerca como para activarse por fosforilación. JAK1, activada por autofosforilación, puede en ese estado fosforilar y activar a JAK2. La fosforilación de las quinasas de tirosinas promueve el reclutamiento de STAT1 (que reconoce a las tirosinas fosforiladas de las JAK y se une a ellas).

La proteína STAT1 constituye la siguiente víctima de la cascada de fosforilación inducida por el interferón-γ. Una vez fosforilada, STAT1 forma homodímeros; éstos, igual que ocurría con los heterodímeros STAT1 y 2, pasan al núcleo, donde actúan como factores de transcripción que regulan la expresión de múltiples genes.

El descubrimiento del mecanismo de señalización en respuesta a interferones, pionero en ese ámbito de la bioquímica, puso las bases para el conocimiento de la señalización mediada por otras citoquinas (IL-2, IL-3, etc.), que ejercen funciones clave en la defensa del organismo contra patógenos y tumores.

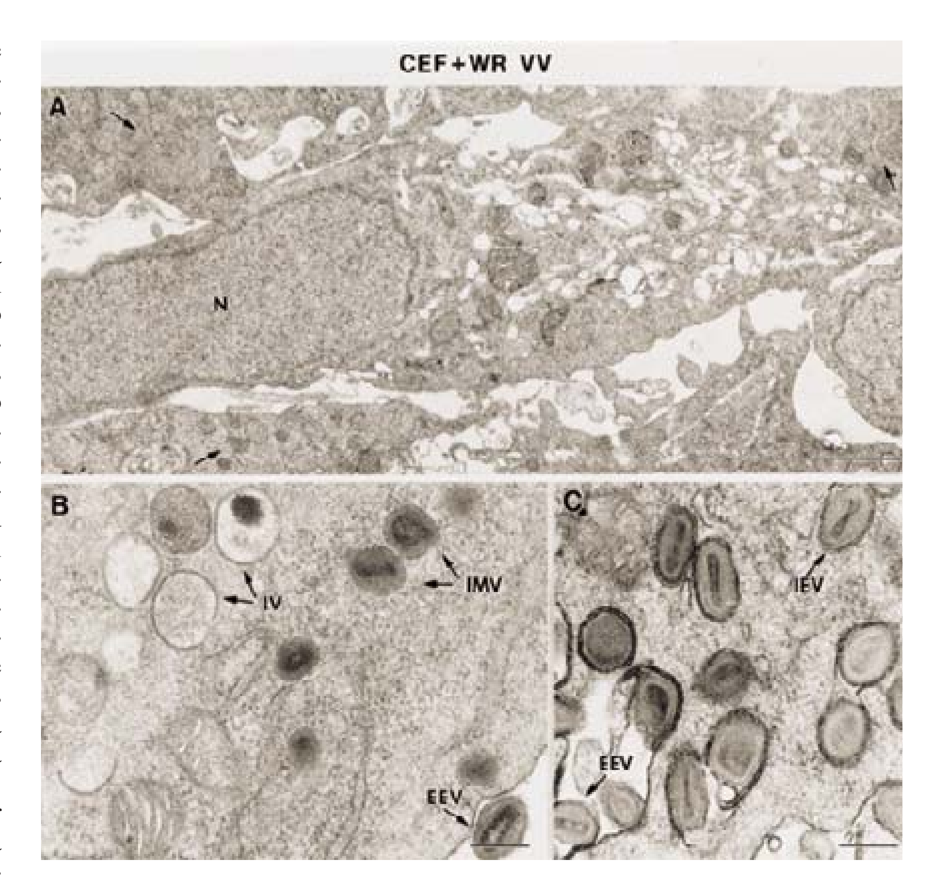


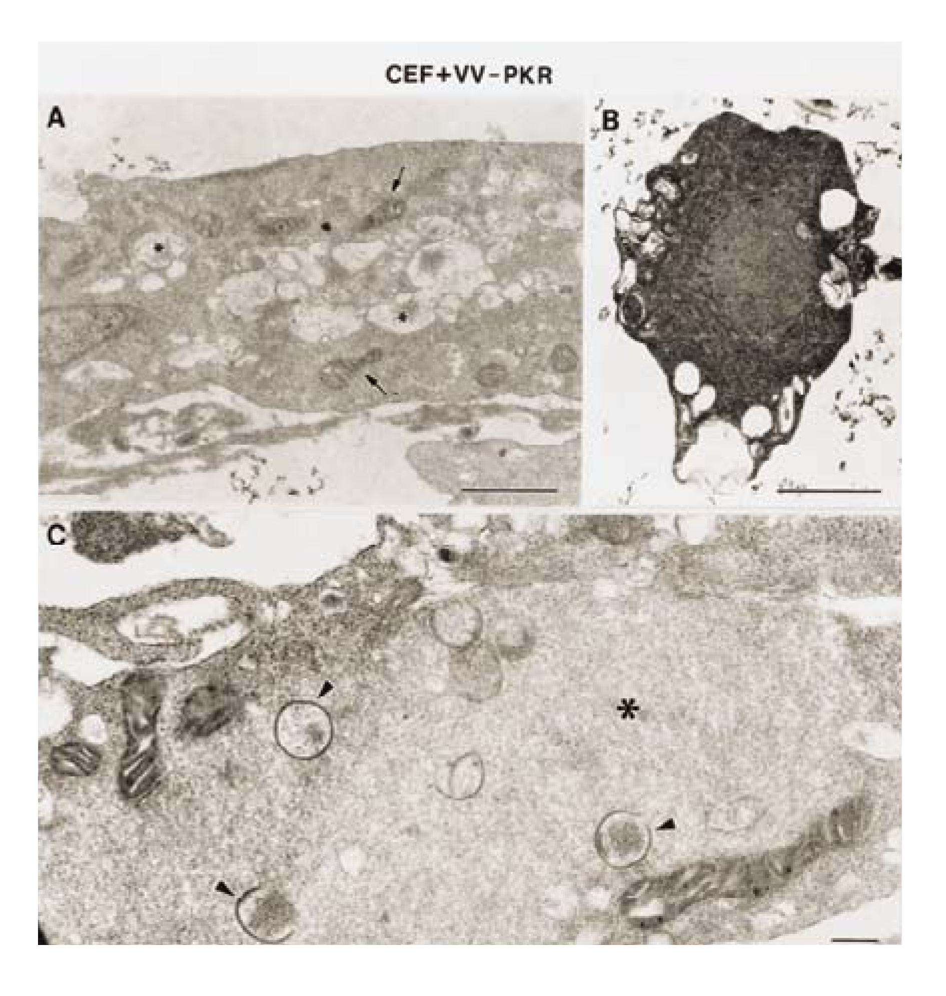

**3. LOS INTERFERONES de tipo I y II se unen a sus respectivos receptores (heterodiméricos y diferentes) en la membrana plasmática. Comienza así una cascada de señalización que provoca la fosforilación de distintos mediadores y culmina en la activación en el núcleo de factores de transcripción con capacidad de inducir la síntesis de múltiples proteínas.**

Los genes inducidos en la fase de transcripción por los interferones serán los responsables últimos de los efectos ejercidos por las citoquinas. Así, los distintos interferones inducirán la sístesis de diferentes conjuntos de proteínas (unas comunes, otras particulares para cada caso). Mediante ensayos con chips de ADN se han identificado entre 100 y 200 proteínas inducidas en respuesta a cada una de las tres clases de interferones, α, β o γ. Esto nos da una idea de la complejidad y especificidad de las respuestas ejercidas por tales factores. Probablemente, esta complejidad aumente cuando dispongamos del análisis completo de los aproximadamente 30-40.000 genes del genoma humano. Hasta aquellos ensayos, sólo se tenía constancia de la inducción por los interferones en una treintena de proteínas, cuya misión particular se ignoraba en la mayoría de los casos.

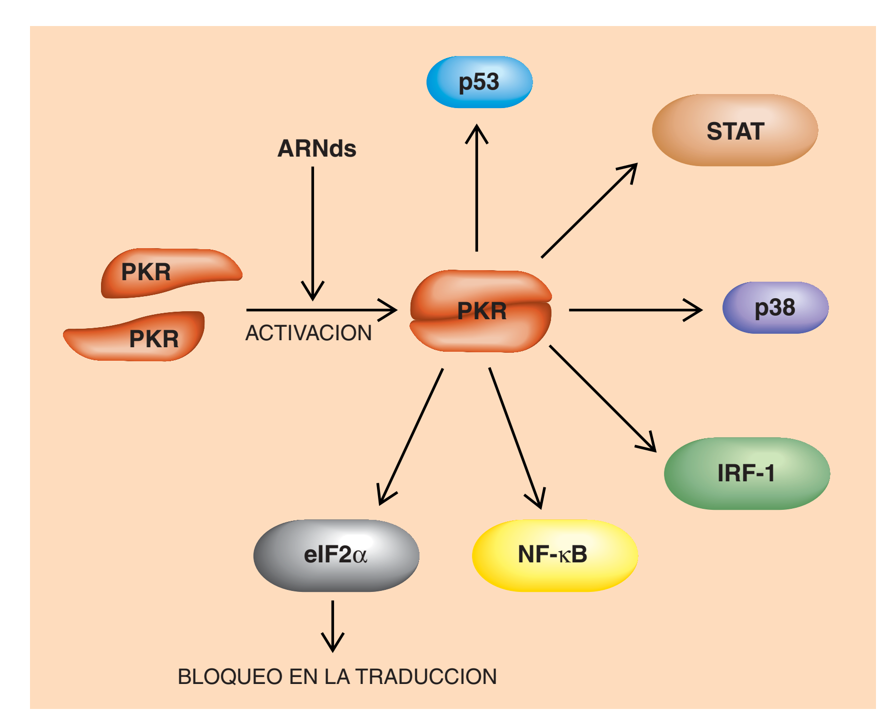
De las proteínas inducidas por interferones cuya acción está ahora comprobada, las hay con propiedades víricas (como la proteína quinasa activada por ARN bicatenario, PKR, las proteínas Mx, la iNOS o la familia de 2-5 A sintetasas), antitumorales (como PKR, IRF-1, p21) o proteínas con capacidad de regular distintos aspectos de la respuesta inmunitaria (complejo principal de histocompatibilidad, LMP, TAP), entre otras muchas.

En los años setenta, el grupo de investigación del NIMR en Londres, del que formaba parte uno de los autores (Esteban), acometió

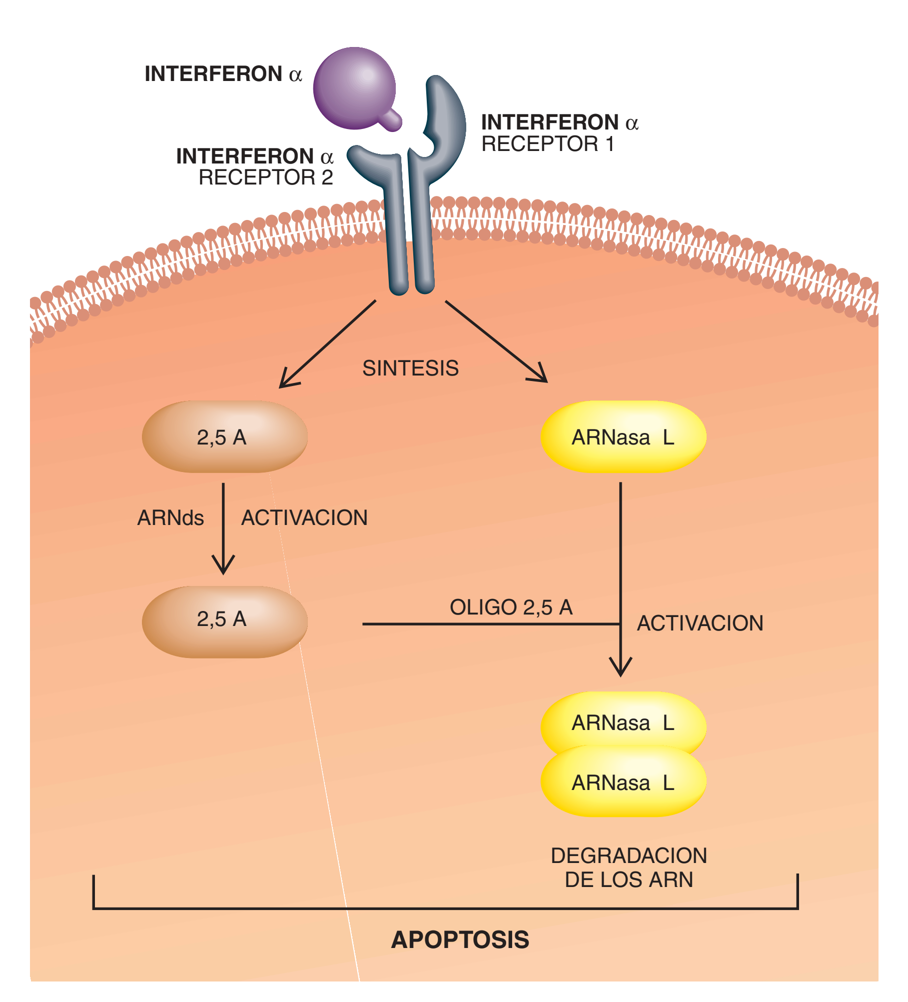



**4. LA PROTEINA QUINASA PKR inhibe la replicación de virus muy diversos. En la parte superior se muestran imágenes de microscopía electrónica en las que se distingue a una célula (*A*) embrionaria de pollo (CEF) infectada con el virus vaccinia (VV, estirpe WR). Se observan diversas partículas maduras (IMV, IEV y EEV) e inmaduras (IV) del virus en el interior de dicha célula (*B* y *C*). Sin embargo, cuando PKR se expresa en las células CEF (*abajo*), éstas mueren por apoptosis (*A* y *B*), y la replicación de vaccinia se ve seriamente comprometida. En la parte inferior (*C*) se observan sólo partículas defectivas del virus como resultado de la expresión de la PKR.**




**5. LA PROTEINA quinasa PKR dimeriza y se activa por la acción del ARN bicatenario. Una vez activada, la enzima fosforila a eIF-2α, lo que produce un bloqueo traduccional en la síntesis de proteínas. También regula la transcripción a través del control de diversos factores celulares.**




una serie de experimentos que llevaron a la demostración de que el interferón inhibía la replicación vírica en el proceso de traducción del ARN mensajero. Se cuestionaba por entonces el carácter proteínico del interferón y que sirviera para algo. Junto con David Metz, trabajando en el mismo laboratorio donde se había descubierto la existencia de la molécula, publicamos un artículo en *Nature* que dio un impulso importante al tema. Además, en colaboración con el grupo de Ian Kerr, en el mismo Instituto, sacamos a la luz entre 1971 y 1974 una serie de estudios que consolidaron al interferón como un regulador de la síntesis de proteínas. Dos de las rutas implicadas en esa acción son las que afectan a la enzima PKR y al sistema de las 2-5A sintetasas/ARNasa L.

La proteína quinasa PKR es un importante mediador de las acciones de los interferones. Se ha demostrado que participa en su acción antivírica y antitumoral. En particular, la PKR ejerce una acción antivírica frente al virus de la inmunodeficiencia humana, el virus vaccinia y el virus de la estomatitis vesicular.

En nuestro laboratorio del Centro Nacional de Biotecnología en Madrid (CNB) hemos demostrado que esta enzima inhibe la formación de partículas del virus vaccinia. Valoraremos mejor la importancia de la proteína quinasa PKR en la respuesta antivírica si advertimos que muchos virus (VIH, virus de la gripe y virus de la hepatitis C, entre otros) usan diversas estrategias para bloquear la síntesis de la enzima, contrarrestando así sus efectos deletéreos para la replicación vírica.

La exquisita sensibilidad de la proteína quinasa PKR como proteína antivírica se ve reforzada por el hecho de necesitar de ARN bicatenario para activarse. Este ARN no se encuentra normalmente en

**6. OTRO MEDIADOR de las actividades antivíricas y antiproliferativas de los interferones es el sistema de la 2-5A sintetasa/ARNasa L, activado a su vez por ARN bicatenario. Culmina en la degradación de ARN y en la inducción de apoptosis.**

las células, sino que se sintetiza durante la replicación vírica. Por eso la enzima se activa selectivamente durante la infección vírica.

La molécula PKR regula la acción de múltiples proteínas e interviene en la inhibición de la síntesis de proteínas. Al fosforilar aquélla a la subunidad pequeña del factor de iniciación eucariótico 2 (eIF-2-α), se crea un complejo inactivo compuesto por eIF-2-GDP y el factor eIF2B, que suspende de inmediato la síntesis de proteínas.

Además de regular la síntesis de proteínas, la proteína PKR modula la acción de diversos factores de transcripción; entre ellos, NF-κB, IRF-1, STAT o p53. De ese modo controla la expresión de varios genes. En nuestro laboratorio hemos contribuido a definir el mecanismo de activación de NF-κB por PKR. El factor de transcripción NF-κB, descubierto por David Baltimore, es un dímero compuesto de diversos factores de la familia de proteína Rel/NF-κB, que se activa en respuesta a estímulos muy diversos; por ejemplo, en presencia de citoquinas proinflamatorias, infección por virus o bacterias y diferentes tensiones, químicas o físicas.

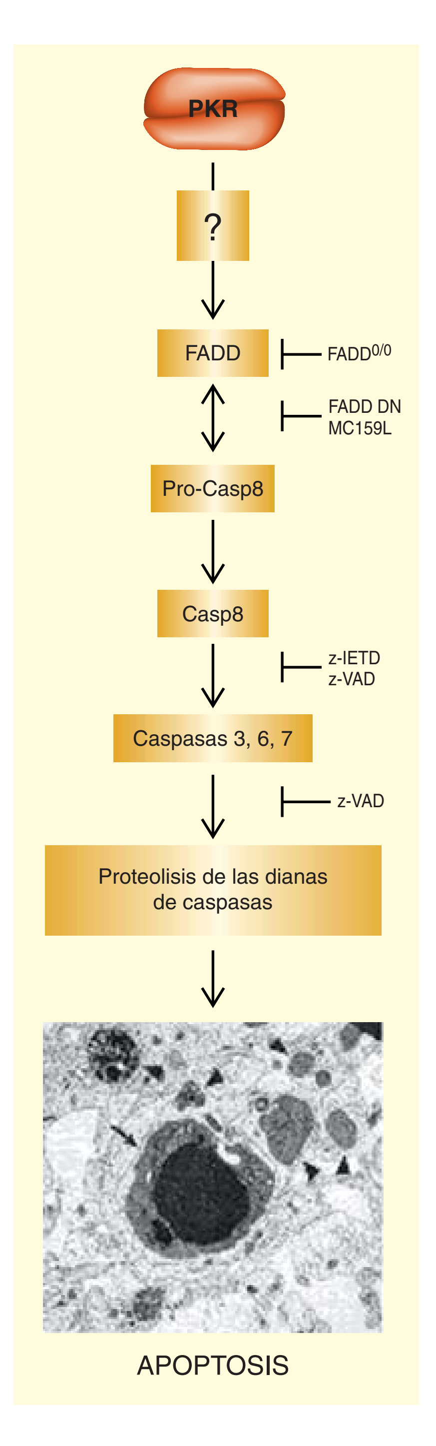
En presencia de PKR entra en acción el factor NF-κB a través de la regulación del complejo IκB quinasa (IKK). Una vez activado el complejo IKK, éste fosforila a la proteína inhibidora IκB, que en condiciones normales se halla unida al dímero NF-κB reteniéndole de manera inactiva en el citoplasma. La fosforilación de IκB posibilita su reconocimiento por el proteasoma, un complejo con diversas actividades proteasas responsable de la degradación de IκB.

Una vez degradado IκB, el factor de transcripción NF-κB queda libre y puede alcanzar el núcleo. Aquí regulará la expresión de diversos genes que intervienen en la respuesta inmunitaria y en el destino (muerte o supervivencia) de las células. Así, la función de la proteína PKR no abarca sólo la regulación de la traducción, sino también la de la transcripción.

Como hemos dicho, las acciones del interferón se deben a la regulación de múltiples genes. En el caso de su misión antivírica intervienen, además, múltiples vías. Una de estas vías es el sistema de la 2-5A. Se trata de una ruta multienzimática, compuesta por sintetasas de 2-5 oligoadenilatos, cuya transcripción se induce por interferones, y una endoribonucleasa, la ARNasa L. Igual que acontecía con la enzima PKR, la eficacia de este sistema contra las infecciones víricas depende de la capacidad que las 2-5A sintetasas posean de activarse en respuesta a la presencia de ARN bicatenario.

Una vez activadas, las 2-5A sintetasas intervienen en la síntesis de 2'-5' oligoadenilatos, unos ácidos nucleicos peculiares y únicos en la naturaleza. Compete a los oligoadenilatos poner en funcionamiento a la ARNasa L que se encuentra latente en las células. La ARNasa L activada causa la degradación masiva de ARN mensajeros (víricos) y de ARN ribosómicos, con la inhibición consiguiente de la síntesis de proteínas en las células infectadas y la apoptosis de éstas, que explicamos en seguida. Semejante sistema ha demostrado tener una notable capacidad antiproliferativa y antivírica contra el virus del sida, el virus vaccinia y el virus EMCV.

**7. LA PROTEINA quinasa PKR induce la apoptosis a través de la activación de caspasa 8 mediada por FADD. Todavía permanecen incógnitas en torno a esta ruta, pero las pruebas fundadas en el uso de mutantes dominantes negativos, inhibidores químicos y células genéticamente modificadas, han servido para desentrañar las líneas generales del proceso.**




En nuestro laboratorio descubrimos en 1994 que el gen de la proteína quinasa PKR causaba la muerte celular programada o apoptosis. La apoptosis es un programa genético de muerte celular. Presenta características propias: condensación y fragmentación del ADN, de distintos orgánulos y de la mem-

## Los autores

JESUS GIL y MARIANO ESTEBAN han desarrollado su actividad conjunta sobre el tema del artículo en el Centro Nacional de Biotecnología, que dirige el segundo. Gil realizó su tesis doctoral en el laboratorio de Esteban sobre el mecanismo de inducción de la apoptosis por PKR, galardonada con el premio Milstein concedido a jóvenes investigadores. Esteban ha venido trabajando sobre los interferones desde el año 1970. Se ha dedicado también al desarrollo de vacunas contra el sida, la malaria y la leishmaniasis. Volvió a España en 1992 después de haber pasado 22 años entre Londres y Nueva York.

brana plasmática, descomposición de la célula en vesículas (cuerpos apoptóticos) y disgregación nuclear.

La apoptosis desempeña una misión importante en diversos aspectos de la vida, que van desde el desarrollo embrionario, hasta el día a día del organismo; elimina células no funcionales, dañinas, peligrosas o simplemente producidas en exceso. La inducción de apoptosis podría ser, sugeríamos entonces, un mecanismo que ligase la quinasa PKR la capacidad antivírica de la quinasa PKR (sirviendo para librar al individuo de células infectadas por virus) con su acción supresora de tumores (no en vano otros supresores de tumores como p53 también provocan apoptosis).

Tres años después, en 1997, demostramos que la ARNasa L también poseía capacidad inductora de apoptosis, lo que ponía sobre el tapete la redundancia en las acciones ejercidas por los interferones. Otros grupos revelarían luego que ambas enzimas (PKR y ARNasa L) intervenían en la apoptosis inducida por causas muy diversas, además de controlar la infección vírica.

La apoptosis se pone en marcha mediante la activación proteolítica en cascada de las caspasas, una familia de proteasas. Las caspasas se encuentran inactivas en las células. Existen dos cascadas principales, una desencadenada en respuesta a señales paracrinas o autocrinas provocadas por ligandos y receptores de las familias del factor de necrosis tumoral (TNF), y otra causada por diversos estímulos lesivos de la mitocondria, que convergen en la activación de las caspasas efectoras 3, 6 y 7.

La ruta inducida por ligandos de la familia del TNF empieza mediante la oligomerización de los receptores de la familia del TNF (o receptores de la muerte o factor de necrosis tumoral), que reclutan a diversas moléculas adaptadoras. El objetivo final es la captación y autoprocesamiento de la caspasa 8, que se activa así y permite el procesamiento de las demás caspasas.

En la otra vía de inducción de apoptosis, intervienen diversas señales que acaban convergiendo en la mitocondria. El daño producido en el orgánulo provoca la liberación al citoplasma de moléculas diversas. Por ejemplo, del citocromo C, que puede unirse y activar a APAF-1, una molécula citosólica adaptadora. El complejo resultante, APAF-1/citocromo C, puede incorporar y activar a la caspasa 9, que pone en marcha la activación de las caspasas efectoras.

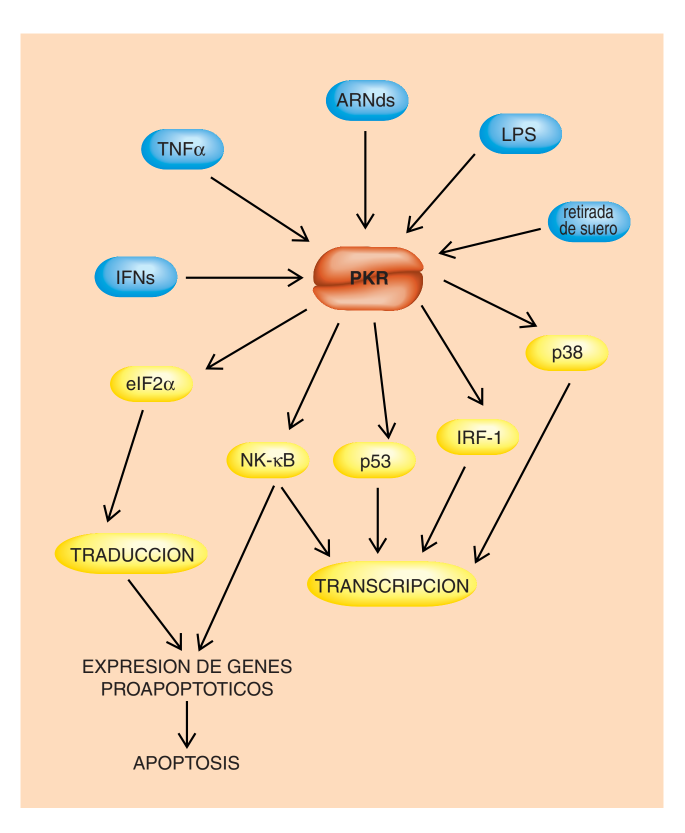
Durante los últimos años nos hemos centrado en el mecanismo de inducción de apoptosis por la enzima PKR. Mediante el uso de mutantes dominantes negativos, específicos para la vía de fosforilación de eIF-2α o de inducción de NF-κB, hemos comprobado que ambas rutas están implicadas en la apoptosis promovida por PKR. De ello se desprende que, a través de la regulación de la traducción y de la transcripción, la proteína PKR modula la expresión de un conjunto de genes que desembocan en la inducción de apoptosis.

El análisis de los mediadores implicados en la muerte celular programada debida a la enzima PKR, nos ha llevado a descubrir que la caspasa 8 constituye la proteasa clave en este proceso. La caspasa 8 se activa durante la apoptosis, inducida por PKR, en presencia de la molécula adaptadora FADD, un mediador común utilizado por diversos receptores de la familia del receptor de TNF.

Sin embargo, en el caso de la apoptosis inducida por la quinasa PKR, parece que la activación de la molécula FADD no depende de los receptores, sino de un mecanismo atípico, similar al observado recientemente para la apoptosis derivada del tratamiento con cicloheximida, del estrés de radiación ultravioleta o del tratamiento con $H_2O_2$.

Los resultados obtenidos hasta la fecha sitúan, pues, a la enzima PKR como un mediador destacado de diversos procesos biológicos. Activada por múltiples estímulos, regula la síntesis de proteínas y la transcripción de genes específicos que determinan la pervivencia o muerte celular.

Conocer los mecanismos precisos de inducción de apoptosis por la quinasa PKR y otras proteínas puede servir para modular de manera racional los tratamientos efectuados con interferón La disponibilidad de diferentes tipos de interferones ha posibilitado la realización de una amplia serie de tratamientos clínicos en humanos. En




**8. EN LA ACTIVACION DE LA PROTEINA PKR convergen múltiples estímulos celulares. Una vez activada, la enzima ejerce su acción sobre diversas dianas que regulan la transcripción y la traducción en la célula, lo que conlleva a inducir una variedad de efectos biológicos.**

ellos ha quedado patente su eficacia contra enfermedades víricas, tumores y enfermedades neurodegenerativas.

Los interferones se han hecho imprescindibles en oncología clínica. Se aplican en leucemias (mielocítica crónica, de célula pilosa), linfoma no Hodgkin, melanoma, sarcoma de Kaposi y papilomas; a ellos se recurre también en enfermedades de origen vírico (hepatitis B y C), y se usan experimentalmente frente a VIH. Sin olvidar su aplicación creciente en enfermedades neurodegenerativas como esclerosis múltiple o esclerosis lateral amiotrófica.

Resulta gratificante para quienes trabajamos en este campo observar cómo, después de más de 40 años, lo que se alegó era un artefacto, ha resultado ser una realidad que alivia múltiples patologías. El conocimiento del amplio espectro de genes inducidos por los interferones por técnicas de "biochips", y el ahondar en las implicaciones funcionales de cada uno de ellos, servirá en un futuro para racionalizar las terapias. Todas estas aplicaciones clínicas se fundarán, como ha ido ocurriendo hasta ahora, en el avance de la ciencia básica.

## Bibliografía complementaria


HOW CELLS RESPOND TO INTERFERONS. G. R. Stark, I. M. Kerr, B. R. G. Williams, R. H. Silverman y R. D. Schreiber, en *Annals Review Biochemistry*, n.º 67, págs. 227-264; 1998.

INDUCTION OF APOPTOSIS BY DOUBLE-STRANDED-RNA DEPENDENT PROTEIN KINASE (PKR) INVOLVES THE ALPHA SUBUNIT OF EUKARYOTIC TRANSLATION INITIATION FACTOR 2 AND NF-κB. J. Gil, J. Alcami y M. Esteban, en *Mol. Cell. Biol*, n.º 19, págs. 4653-4663; julio de 1999.

PKR; A SENTINEL KINASE FOR CELLULAR STRESS. B. R. G. Williams, en *Oncogene* n.º 18, págs. 6112-6120; 1999.

INDUCTION OF APOPTOSIS BY THE DSRNA-DEPENDENT PROTEIN KINASE (PKR): MECHANISM OF ACTION. J. Gil y M. Esteban, en *Apoptosis* n.º 5, págs. 107-114; 2000.

# Ensayo para Marte



1. EL PAISAJE EXTRATERRESTRE de la canadiense isla de Devon es el escenario de una base marciana simulada.



# Para prepararles el camino a las futuras misiones a Marte, un grupo de científicos simuló, en el árido Artico canadiense, tareas a realizar en el planeta

Robert Zubrin

Devon es una isla del Artico canadiense, desolada pero de rara belleza. Sólo está a 1500 kilómetros del Polo Norte. Hará unos 23 millones de años un meteorito golpeó allí con la fuerza de cien mil bombas de hidrógeno y vació el cráter Haughton, que tiene veinte kilómetros de diámetro. El impacto, que acabó con todo rastro de vida, destrozó el suelo. De ahí el singular paisaje que se observa de piedras fracturadas por el choque y de extensas elevaciones montañosas de polvo compactado. La mayor parte de la isla carece de árboles, arbustos y hierbas. Parece un mundo extraterrestre, y como tal se la siente, hasta el punto de que durante los últimos cuatro años un equipo de científicos de la NASA ha estado estudiando su geología para saber de Marte.

Fundé en 1998 la Sociedad Marte, organización dedicada a promover la exploración del planeta rojo. Pascal Lee, el geólogo que dirigía el equipo que mandó la NASA a Devon, propuso que la Sociedad construyese una simulación de una base marciana en el cráter Haughton. Los investigadores de esa estación explorarían el lugar sujetos a muchas de las mismas condiciones y restricciones que padecería una misión tripulada en el planeta rojo. Ensayarían equipamientos, los sistemas de reciclar agua y los trajes espaciales. Someterían el material a meses de rudeza sobre el terreno en vez de limitarse a las pruebas de laboratorio.

Mientras se estudiaba la geología y la microbiología de Devon se vería cuánta agua necesitaría de verdad un equipo que explorase Marte. Se investigarían, además, aspectos fundamentales de la psicología de la tripulación: los efectos del aisla-

miento y confinamiento en un cubículo, la dinámica del equipo, cómo afectaría la forma en que se dispusiese la estación al rendimiento de los astronautas.

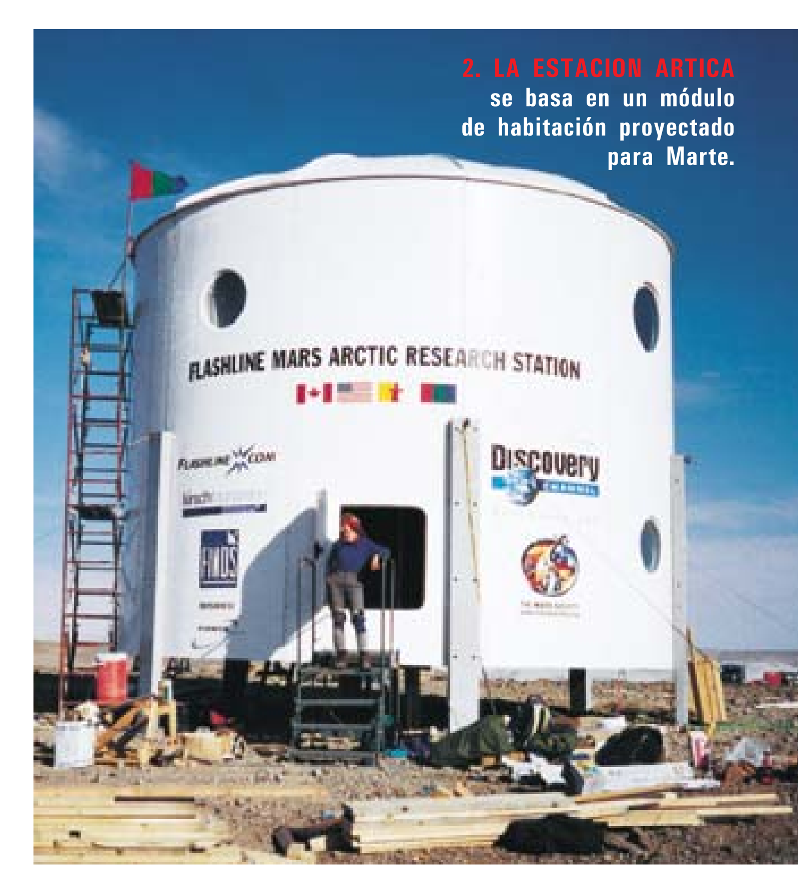
Asimismo, el grupo de la isla podría determinar qué maneras de proceder irían bien en el planeta rojo y cuáles serían un lastre para los futuros astronautas. Y desarrollaría el arte de las operaciones combinadas, es decir, de coordinar los elementos humanos y robóticos de modo que se maximizara su eficiencia. En pocas palabras, la tripulación de la isla de Devon iba a aprender a vivir y a trabajar en Marte.

La Sociedad Marte recaudó para el proyecto 600.000 dólares gracias a donantes privados. En enero de 2000 encargó a Infrastructure Composites International (Infracomp) que fabricase la estación. Esta empresa había inventado un material de fibra de vidrio con estructura de panal, en un principio con la intención de emplearlo en la construcción de ciudades que flotaran en el mar. Fortísimo, más ligero que otros, era ideal para nuestro habitáculo marciano. El diseño de la estructura —un cilindro de unos ocho metros de diámetro cerrado por una cúpula y con dos cubiertas de tres metros de puntal— coincidía con el propuesto por la NASA para un módulo marciano de habitación para seis personas.

El plan consistía en que unos aviones de transporte C-130 del Cuerpo de Marines de Estados Unidos dejasen caer con paracaídas sobre Devon los grandes componentes de fibra de vidrio. El 5 de julio se hicieron de ese modo las cinco primeras entregas, que contenían las paredes, las patas y parte de las secciones de la cúpula del habitáculo; llegaron a salvo al suelo, si bien unos vientos racheados llevaron casi todas a cientos de metros del lugar donde se iba a construir. Tampoco salió mal la sexta entrega, el 8 de julio, que portaba las demás secciones de la cúpula y otros equipamientos. La última del día, en cambio, fue un desastre. La carga se separó del paracaídas a trescientos metros de altura y cayó a plomo. Se destruyeron los suelos de fibra de vidrio del habitáculo, lo mismo que el remolque que iba a mover los 360 kilos de los paneles que habían de hacer de paredes y la grúa que los tenía que levantar.

Sin el remolque, los suelos y la grúa, no podía ensamblarse la estación. El proyecto parecía haber fracasado. Alguien recordó el desastre del Mars Polar Lander, el vehículo espacial no tripulado que se estrelló contra la superficie marciana en diciembre de 1999. Pero había una diferencia fundamental: nosotros trabajábamos con una tripulación humana.

Lee y yo formamos una nueva e improvisada cuadrilla de construcción con científicos y voluntarios de la Sociedad Marte, jóvenes inuit contratados en Resolute Bay, localidad que estaba a unos 170 kilómetros, y unos periodistas. Frank Schubert, miembro fundador de la Sociedad Marte, voló hasta la isla para dirigir las obras con la ayuda de Matt Smola, un capataz, y del vicepresidente de Infracomp John Kunz. Se hizo un nuevo remolque, “el Kunzmóvil”, con madera y piezas de un vehículo para equipajes estropeado del aeropuerto de Resolute Bay. Durante tres días de lluvia gélida llevamos con él todos los componentes dispersos del habitáculo hasta donde íbamos a construirlo.



**2. LA ESTACION ARTICA** se basa en un módulo de habitación proyectado para Marte.

## La isla de Devon y Marte

Una lista de las semejanzas y de las diferencias compilada por Pascal Lee, del Instituto SETI y del Centro Ames de Investigación de la NASA:

**SEMEJANZAS. Medio ambiente:** Devon y Marte son desiertos polares: fríos, secos, ventosos, rocosos y polvorientos. **Geología:** es posible que los espesos depósitos de fragmentos de roca creados por el golpe del meteorito del cráter Haughton se parezcan al cascote de la superficie marciana. Además, los sistemas de valles creados por la erosión del terreno de Devon tienen un aspecto parecido a muchos de los valles y gargantas que se ven en el planeta rojo. **Biología:** Dentro de las rocas de Devon afectadas por el impacto viven microorganismos. Se han encontrado, además, estromatolitos (fósiles de colonias de microorganismos primitivos). En Marte quizás existan formas de vida semejantes o sus fósiles.

**DIFERENCIAS. Gravedad:** la gravedad marciana es sólo alrededor de un tercio de la terrestre. **Temperatura:** la temperatura media en Devon es de –15º, por –55º en Marte. **Atmósfera:** mientras que en la atmósfera de la Tierra predominan nitrógeno y oxígeno, la marciana es en un 95 % dióxido de carbono y la presión en la superficie es menos de un uno por ciento que en la Tierra. **Radiación:** la radiación ultravioleta de Marte es unas 800 veces más intensa que en Devon en verano.

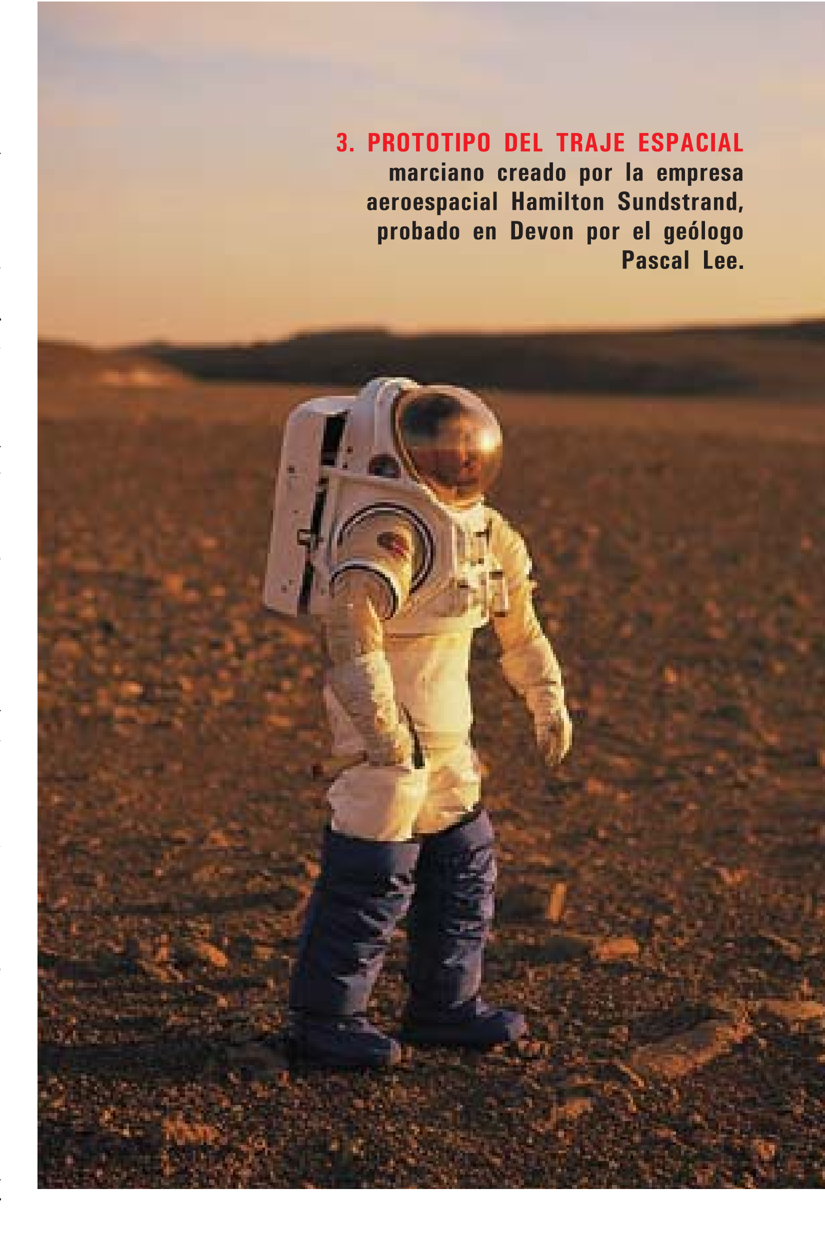
A continuación preparamos unos suelos de madera para que sustituyesen a las cubiertas de fibra de vidrio echadas a perder; nos trajo la madera una avioneta desde Resolute Bay. Para levantar las veinte toneladas del habitáculo sin una grúa tuvimos que emplear técnicas de construcción conocidas por los romanos. Una cuadrilla de doce iba a tener que izar cada panel de seis por dos metros de las paredes y ponerlos en su sitio con un torno, un andamio, puntales de madera y unas cuerdas de maniobra. Sabíamos también el peligro que tal operación comportaba si aparecían los frecuentes vientos de 40 nudos de Devon. Pero la tarde del 19 de julio se disiparon las nubes y tuvimos cielos soleados, un aire insignificante y una temperatura de cinco o seis grados. No cabe esperar nada mejor de la isla.

## Horas extra árticas

Corríamos contra el reloj; no sabíamos cuánto iba a durar el buen tiempo. Aprovechamos que en el verano ártico hubiera siempre luz diurna para trabajar catorce horas diarias. En tres jornadas levantamos las paredes. El cielo seguía despejado. Pusimos parte de los suelos de madera y con poleas y cuerdas alzamos las dos primeras secciones de la cúpula, pesaban 160 kilos, hasta la cubierta superior. Construimos entonces un andamio y levantamos las dos secciones sobre un elemento central; se formó un arco.

Quedaba instalar las otras secciones de la cúpula. Pero a esas alturas las largas jornadas de trabajo habían empezado a hacer mella. La cuadrilla, casi exhausta, cometía errores. La tarde del 26 de julio, cuando empezaba por fin a levantarse aire y amenazaba con llover, colocamos donde correspondía la última sección de la cúpula. Sólo faltaba construir dentro del habitáculo las literas, la cámara de descompresión y los lavabos. Volvió la lluvia gélida, pero no importaba. Haríamos nuestro trabajo dentro de la mejor casa de Devon.

El 28 de julio celebramos la terminación del habitáculo. Por culpa de los retrasos en la construcción la simulación de la misión sólo iba a poder durar cuatro días. Al mando de Carol Stoker, del Centro Ames de Investigación de la NASA, los seis miembros de la tripulación vivieron y trabajaron en el habitáculo, y llevaron a cabo una serie de recorridos exploratorios y la prueba de campo del prototipo de un traje espacial concebido para Marte. El equipo mantenía contacto por radio con un control de la misión simulado en Denver; entre las transmisiones se insertaba un retraso de veinte minutos para reproducir los desfases temporales que habría en las comunicaciones por radio entre la Tierra y Marte.



**3. PROTOTIPO DEL TRAJE ESPACIAL marciano creado por la empresa aeroespacial Hamilton Sundstrand, probado en Devon por el geólogo Pascal Lee.**

El 4 de agosto se selló el habitáculo pensando en el invierno. Desde entonces la Sociedad Marte ha estado preparando este verano de 2001 en que la estación cobija durante ocho semanas investigaciones sujetas a protocolos que simulan de forma rigurosa una misión en Marte. Todo el que sale del habitáculo lleva un traje espacial simulado y pasa veinte minutos en la cámara de descompresión tanto a la ida como a la vuelta. Intentamos realizar un programa prolongado de exploración geológica y microbiológica de campo constreñidos por esas ataduras y otras parecidas. Estamos seguros de que vamos a tropezar con problemas operativos, pero precisamente son esos problemas los que queremos que salgan a la luz.

Muchas cosas salieron mal en la isla Devon. Con toda probabilidad también se torcerán muchas cuando los astronautas hagan el primer viaje a Marte. Al aventurarse en lo desconocido uno puede esperarse lo inesperado. Pero como aprendimos de nuestra experiencia ártica, una tripulación con ingenio y maña puede superar casi cualquier obstáculo.


## El autor

ROBERT ZUBRIN, presidente y cofundador de la Sociedad Marte, fundó Pioneer Astronautics, que participa en la investigación y desarrollo técnico para la exploración del espacio.

# Crecimiento y caída del pelo

*Comienzan a conocerse mejor las moléculas que controlan la aparición del pelo. En su dominio habrá de fundarse la lucha contra la calvicie y contra el crecimiento capilar desmesurado*

Ricki L. Rusting

Rondando los 50, uno de cada dos seres humanos sufre pérdida de cabello. Los varones experimentan un progresivo retroceso y se les queda calva la coronilla; las mujeres ven que sus cabellos se enrarecen y pierden vigor. Por otro lado, muchísimas personas se irritan porque les sale demasiado pelo donde no quisieran.

Aunque mejorable, hay algún remedio. Lo indicado sería administrar fármacos que actuaran sobre las moléculas que regulan la producción del cabello. Pero antes debemos acotarlas.

Cinco años atrás, apenas si se conocían las bases biológicas involucradas. Hoy día, diversas líneas de investigación empiezan a sacar a la luz los controles moleculares sobre la génesis del pelo. Cuando concluyan sus análisis, podremos determinar las células que se apartan del proceso correcto en condiciones específicas del pelo y establecer la forma de restaurar un sistema regulador defectuoso.

Por extraño que parezca, las investigaciones sobre génesis capilar pueden también beneficiar a pacientes afectados por graves trastornos sin relación alguna con el pelo. A principios de este año, se halló dónde residían las células madre que sustituyen a las células productoras de pelo perdidas y rejuvenecen sin cesar la epidermis. Si se logra convertir estas células maleables en otros tipos de tejido, particularmente nervios y músculos, se dispondrá de una fuente de células madre fácilmente accesible para un posible tratamiento del Parkinson y el Alzheimer, obviando los problemas éticos que plantea extraer tales células de los embriones humanos.

## El folículo

Para identificar los controles moleculares que afectan a cualquier proceso, primero hay que conocer las líneas básicas del propio proceso. Hacia 1995, mediante técnicas microscópicas, se habían esquematizado las etapas de la formación de los folículos pilosos (los diminutos bulbos que producen el tallo piloso) en el embrión en desarrollo. También se había descrito el ciclo capilar, es decir, las fases de producción o suspensión de la generación de pelo que experimenta periódicamente el folículo durante toda la vida.

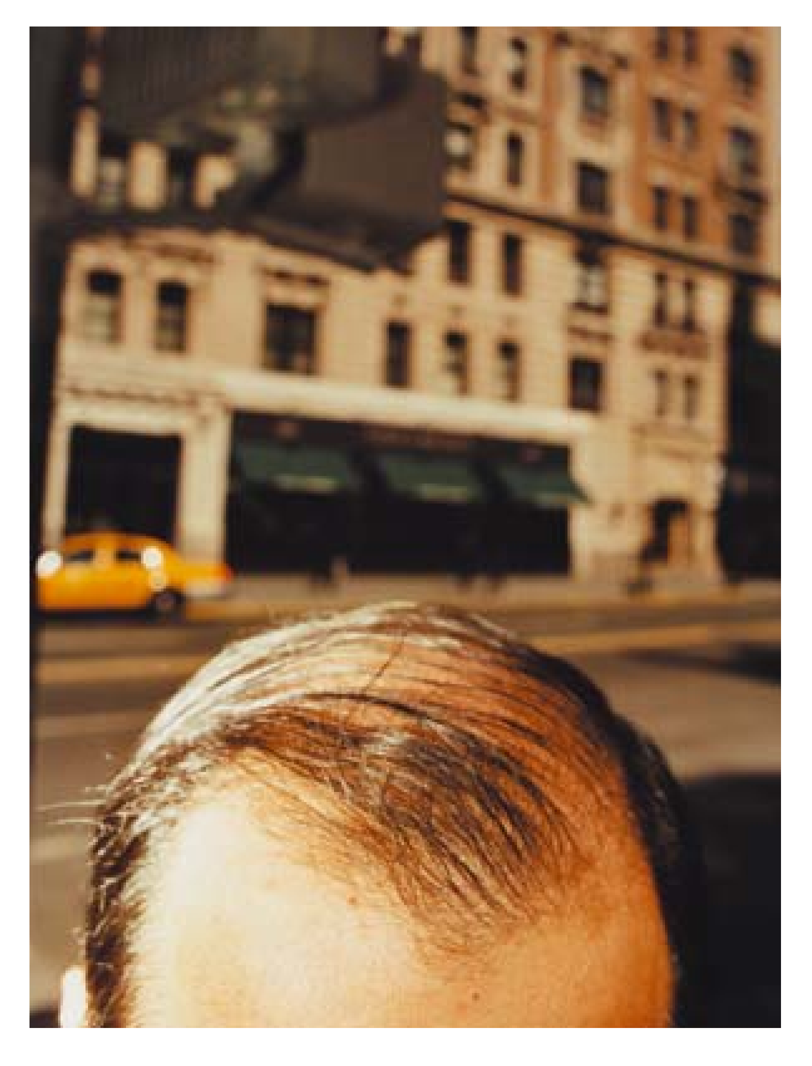
Los folículos pilosos se forman durante la gestación como respuesta a un diálogo entre el ectodermo —la capa celular más externa— y el mesodermo subyacente del embrión. En primer lugar, desde una zona del mesodermo se dan señales al ectodermo situado encima para que genere un apéndice. Respondiendo a esta señal, las células del ectodermo se organizan, proliferan e invaden el mesodermo, convirtiéndose en una estructura alargada, el germen piloso.

A continuación, el germen dirige las células del mesodermo que le subyacen de manera que se agrupen para formar la papila dérmica del folículo piloso. Esta estructura viene a ser como una central de mando: ordena a las células germinales que se multipliquen de nuevo y se conviertan en un folículo piloso abierto. Por último, la sección superior, permanente, del folículo contiene una glándula sebácea y un abultamiento, estructura que constituye el origen de la mayoría, si no la totalidad, de las células madre que llenan el tallo piloso, la glándula sebácea y la epidermis a través de toda la vida. El segmento inferior del folículo, por debajo del bulbo, se convierte en la región productora del pelo y es la parte que pasa por diferentes fases cíclicas, una vez completado el desarrollo del embrión.

Durante el desarrollo, aparece esta sección inferior al difundirse hacia abajo las células procedentes del germen piloso, a la manera de una raíz que se va hundiendo en la dermis y forma allí una matriz de aspecto globular en torno de la papila dérmica. Esta papila estimula la división de las células de la matriz. Al ser empujadas hacia arriba las células de la matriz y perder el contacto con la papila dérmica, cesan de dividirse y maduran, proceso conocido como diferenciación terminal.

Las células de la matriz situadas directamente sobre el ápice de la papila dérmica maduran para convertirse en células pilosas; es decir, producen las fibrosas proteínas de queratina que caracterizan al pelo. Otras células de la matriz más periféricas se diferencian para formar la vaina interior de la raíz, que sirve de vaso al tallo piloso. Se desarrolla, además, una cubierta exterior de la raíz en torno de la vaina interior. Nuevas células pilosas presionan hacia arriba las células más antiguas; irrumpen éstas a través de la superficie epidérmica, mueren, y se forma un tallo de células muertas, ricas en queratina. Estas células muertas, prácticamente indestructibles, persisten adornando la cabeza y cubriendo el cuerpo de vello.

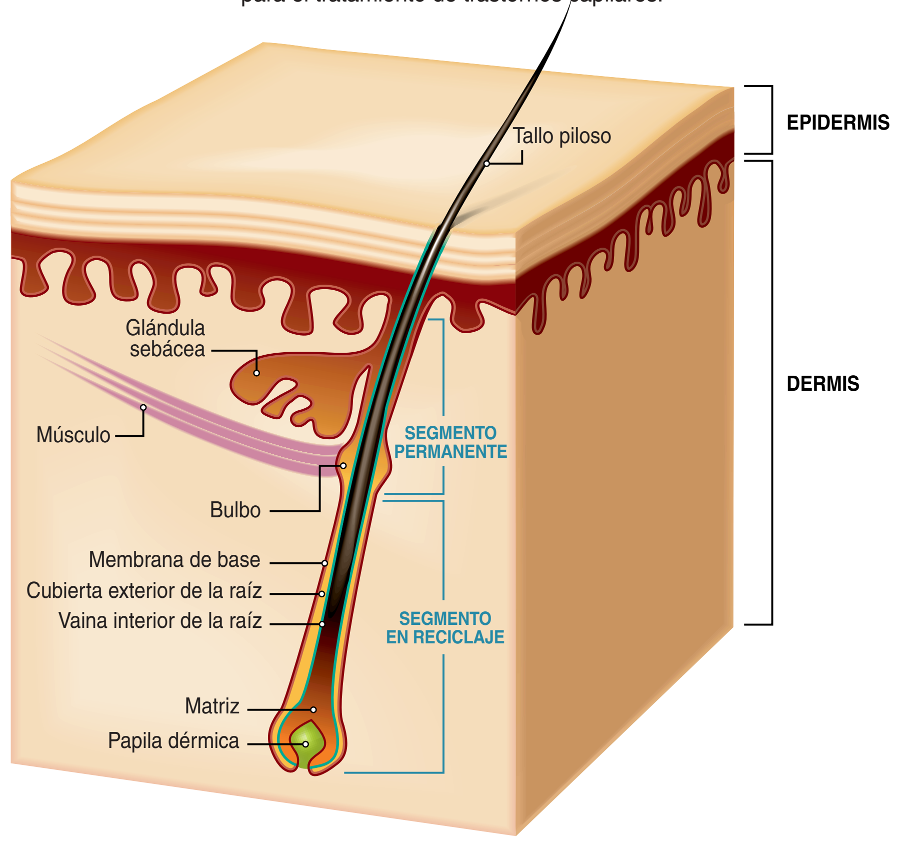
Al final de la gestación, el nuevo ser humano viene al mundo con cinco a seis millones de folículos pilosos distribuidos por el cuerpo según un patrón de origen genético. A partir de ahí ya no se crea ningún nuevo folículo. La palma de la mano y la planta del pie son los únicos lugares que carecen en absoluto de folículos; en otras zonas aparentemente desnudas de pelo o vello crecen en realidad pelos cortos y muy finos.



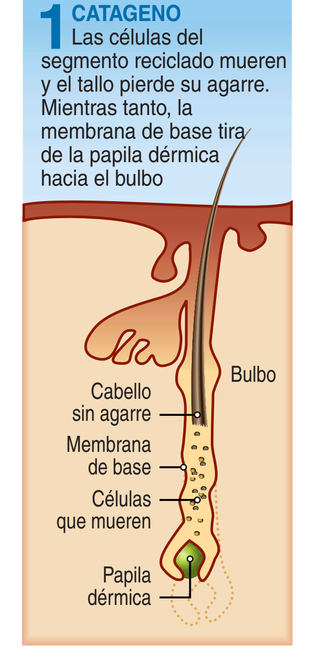
**1. A MENUDO LA CALVICIE no se debe a la muerte de los folículos, sino a su contracción y disfunción. Conocemos ya muchas de las etapas que conducen al desarrollo de los folículos pilosos en embriones y a la producción de pelo durante toda la vida. Las proteínas señalizadoras de la familia denominada Wnt intervienen en la dirección de gran número de estas etapas. Se están descubriendo, además, nuevas moléculas reguladoras.**

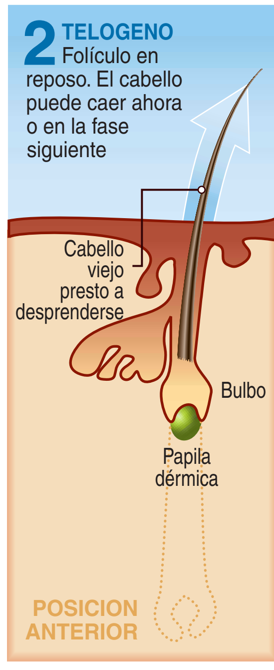
## EL FOLICULO PILOSO

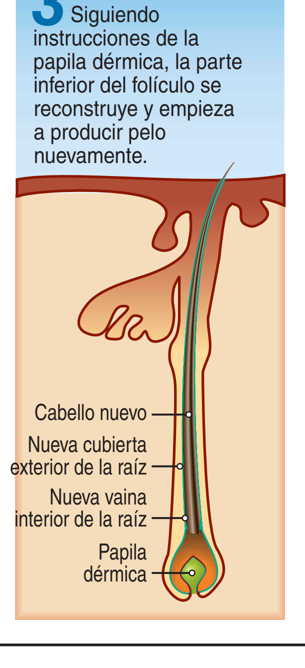
El folículo piloso maduro consiste en una estructura bulbosa, de tipo vascular, que produce el tallo piloso. En el transcurso de la vida, los folículos pasan por ciclos de crecimiento y regresión. Ya se han identificado numerosas moléculas que intervienen en el control de esos ciclos, lo que sugiere nuevas estrategias para el tratamiento de trastornos capilares.




### FASES DEL CICLO VITAL DEL FOLICULO PILOSO




### Reciclaje

Los folículos comienzan a reciclarse a los dos o tres años de su nacimiento. Se ha demostrado que su ciclo consta de tres fases. En la primera, la de catágeno, las células epiteliales subyacentes al bulbo cometen esencialmente un suicidio, dejando sólo tras de sí la papila dérmica y una membrana (la membrana de base) que anteriormente rodeaba la región que ahora se seca. Con la muerte de las células, la membrana se contrae y tira de la papila dérmica hacia el bulbo. En el cuero cabelludo este desplazamiento dura cerca de dos semanas. Mientras tanto, el tallo piloso pierde su profundo arraigo en la dermis y, por tanto, queda presto para desprenderse en las dos fases siguientes.

Cuando la papila dérmica llega al bulbo, los folículos entran en la fase de reposo, de telógeno. Esta etapa suele abarcar unos tres meses en la cabeza humana, pero su duración puede variar por una serie de factores, como por ejemplo la depilación o las lesiones en los folículos, que tienden a acortarla.

A la de telógeno sigue la fase de anágeno. Muy pronto, algunas de las células madre procedentes del bulbo se dividen y descienden a lo largo de la membrana de base para convertirse en células de matriz o de la cubierta exterior de la raíz. Una vez formadas, las células de matriz proliferan y terminan por engendrar las células pilosas y la vaina interior de la raíz, repitiendo las etapas del desarrollo embrionario. Esta repetición implica que los eventos del anágeno se hallan probablemente controlados por algunas de las mismas moléculas señalizadoras que actúan durante el desarrollo.

Los folículos reconstituidos en el anágeno producen algo más de un centímetro de cabello humano por mes, y suelen mantener dicho crecimiento hasta seis u ocho años. La longitud del anágeno determina cuánto puede crecer un cabello individual. En un día cualquiera, un veinteañero tendrá al-

rededor del 90 por ciento de los folículos de su cabellera en fase productiva, de crecimiento, y el 10 por ciento inactivos o en proceso de recesión; se le caerán de 50 a 100 cabellos.

El cabello no se vuelve ralo porque desaparezcan los folículos, sino porque la relación entre folículos en fase de crecimiento y de recesión se altera en sentido desfavorable. Además, en los afectados por calvicie numerosos folículos se encogen progresivamente y al final sólo producen cabellos pequeños y descoloridos.

Como realmente sucede durante el desarrollo folicular en el embrión, en la fase de anágeno la papila dérmica envía señales a las células de la matriz para que se dividan y luego se diferencien en células pilosas. De ahí el interés creciente por descubrir la naturaleza de las señales que emite la papila dérmica durante el desarrollo y los ciclos. Todavía no se tiene una respuesta, pero en los últimos años el grupo encabezado por Elaine Fuchs, de la Universidad de Chicago, ha descubierto que las señales de la papila dérmica probablemente transmiten en gran medida sus órdenes activando otras moléculas señalizadoras, miembros de la familia de proteínas Wnt. Desde hace tiempo se reconoce que las proteínas Wnt son reguladores decisivos en los procesos de desarrollo de mamíferos y otros organismos.

## La proteína Wnt

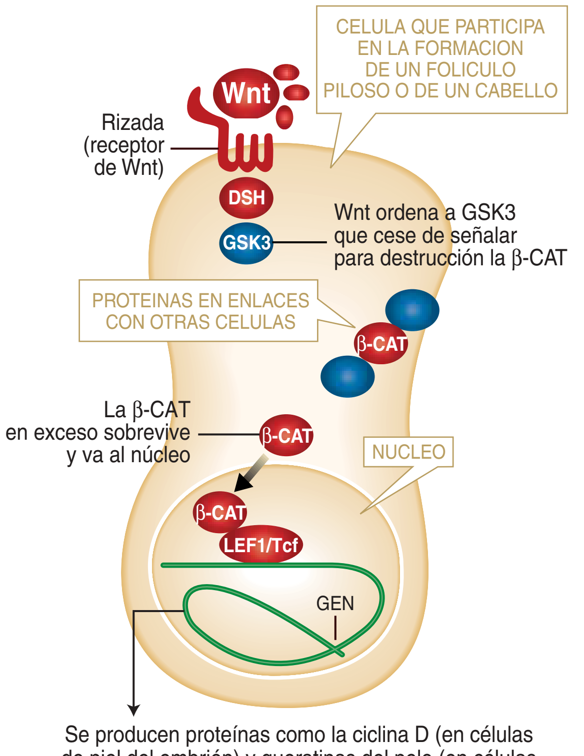
Fuchs se tropezó incidentalmente hace unos seis años con las primeras pistas sobre la importancia de las Wnt para el pelo. En aquel momento, y por motivos ajenos al tratamiento de los trastornos del cabello, se proponía identificar las moléculas señalizadoras que ordenan a ciertas células de la matriz iniciar la producción de queratinas del pelo.

El caso frecuente es que una célula inicie un comportamiento tal como la producción de nuevas proteínas tras haber ligado una molécula procedente del exterior a un receptor situado en la superficie de la célula y haber desencadenado una cascada de interacciones moleculares en el interior de la misma. Estas cascadas son señales que suelen conducir a la activación de genes específicos del núcleo, culminando en la producción de las proteínas cifradas por los genes. Sabiendo esto, Fuchs empezó a buscar las moléculas que imponen la conversión de células de matriz en células pilosas, tratando de determinar qué moléculas del núcleo activan los genes de queratina capilar.

En 1995 su equipo descubrió que en el proceso activador de los genes de queratina participaba una proteína reguladora, el factor potenciador de linfocitos 1 (LEF1). También estaba presente durante la formación del folículo piloso en el embrión, donde aparecía en las primeras agrupaciones de células del ectodermo, así como en las células destinadas a formar la papila dérmica. Obedeciendo presumiblemente a órdenes de alguna señal externa, el LEF1 se activaba y ayudaba a excitar los genes necesarios para la constitución del folículo o el crecimiento del pelo. En lí-

## CONTROLES MOLECULARES SOBRE LA PRODUCCION DEL PELO

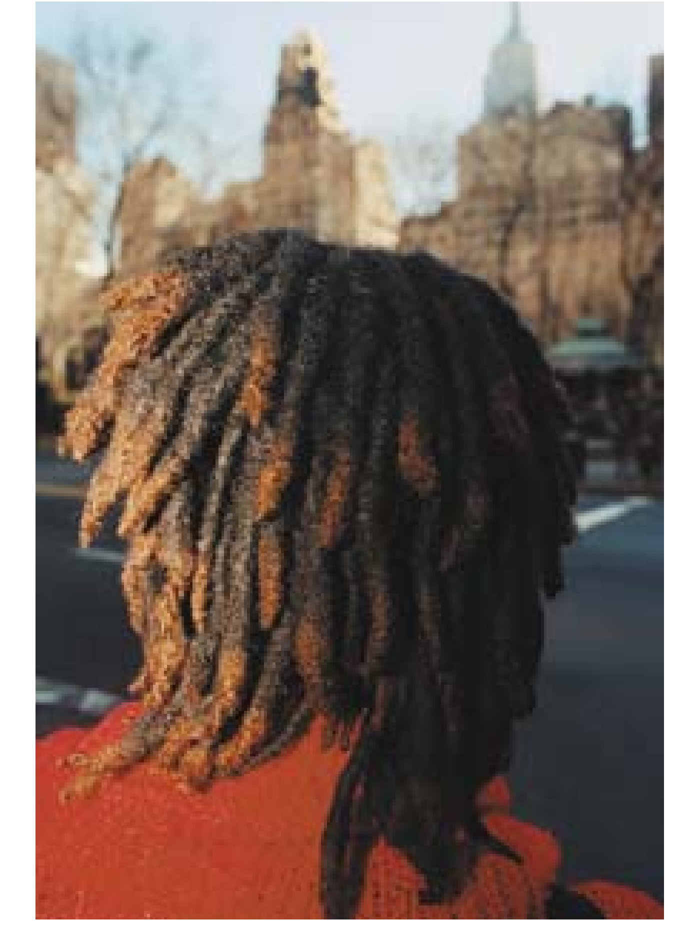
Las proteínas Wnt desempeñan un papel importante para inducir a las células de la piel embrionarias a que elaboren folículos pilosos y más tarde estimular a las células del folículo para producir pelo durante toda la vida. Las Wnt ordenan a las células que cesen de degradar otra proteína, la beta-catenina (β-CAT), la cual se une al LEF1 u otra proteína conexa para ayudar a activar genes específicos. Estos genes, a su vez, dan origen a proteínas que promueven la especialización de las células y contribuyen a la formación del folículo o del propio pelo. Las moléculas comprendidas en el trayecto de señalización Wnt o en interacción con el mismo podrían algún día ser el objetivo de fármacos dirigidos a reforzar o disminuir la producción de pelo.




Se producen proteínas como la ciclina D (en células de piel del embrión) y queratinas del pelo (en células foliculares que se convierten en células pilosas)

### PROTEINAS QUE PUEDEN INTERACTUAR CON EL TRAYECTO DE SEÑALIZACION Wnt EN LA PIEL

Proteína morfogénica ósea
Factor de crecimiento del fibroblasto
Noggin
Sonic hedgehog
Sox**
Factor beta transformador del crecimiento
Winged-helix *nude*



**2. EL CUERO CABELLUDO DE UN ADULTO ostenta por término medio unos 100.000 folículos. El pelo puede estirarse en el agua cerca de un tercio de su longitud sin sufrir deterioro. Pero el llevar continuamente cintas apretadas, trenzas o moños puede provocar manchas de calvicie permanentes.**

nea con ese razonamiento, Rudy Grosschedl y su equipo, por entonces en la Universidad de California en San Francisco, descubrieron que sin LEF1 los ratones no lograban crear su revestimiento piloso. Y cuando el grupo de Fuchs consiguió ratones con exceso de LEF1 en la piel, los múridos produjeron más folículos pilosos de lo normal.

Casi al mismo tiempo, otros grupos demostraron que el LEF1 no podía activar por sí mismo los genes, sino que debía primero acoplarse con una segunda proteína, la beta-catenina. El único mecanismo conocido desencadenante de este acoplamiento era la activación de la cascada señalizadora, que se inicia con la unión de una molécula de Wnt a la superficie de la célula. La beta-catenina ayuda a formar enlaces con las células vecinas. En ausencia de la señalización por Wnt, una enzima del interior de las células señala la destrucción de toda beta-catenina que no se haya utilizado. Las Wnt ordenan a las células que mantengan inactiva la enzima. Con la enzima fuera de juego, la beta-catenina queda en libertad para acumularse y emparejarse con el LEF1 o uno de sus parientes.

Combinados con los descubrimientos de Fuchs, estos resultados sugerían que las moléculas Wnt y las de beta-catenina rescatadas podrían ser esenciales para la formación del folículo y la producción del pelo. Confirmaron tal hipótesis posteriores experimentos en ratones. Así, el equipo de Fuchs ideó un procedimiento para marcar las células que activan los genes que anexionan el LEF1 respondiendo a una señal de Wnt en un embrión en desarrollo. De tales experimentos se infería que las Wnt constituían la señal emitida por el mesodermo hacia el ectodermo suprayacente para que empezara a generar un apéndice, y era la señal ectodérmica que indicaba al mesodermo subyacente la formación de la papila dérmica. Y más todavía, en una etapa avanzada del desarrollo, tras la formación de los folículos, las Wnt resultaban ser el mensaje merced al cual las células matriciales situadas sobre la papila dérmica se diferenciaban en células pilosas.

La importancia crucial de las Wnt tuvo una confirmación aún más espectacular cuando el equipo de Fuchs consiguió ejemplares de ratón que, una vez nacidos, no podían degradar la beta-catenina en sus células epidérmicas. De este modo, las células se comportaban como si estuvieran recibiendo una señal Wnt a perpetuidad. Al hacerse adultos, estos roedores lucían un pelaje de insólita lozanía por haberse formado nuevos folículos pilosos entre los que se crearon durante el desarrollo embrionario.

Sin duda es sugestiva la producción de nuevos folículos, pero otros resultados de los estudios en roedores ponen sordina a ilusorias esperanzas en las Wnt. Al envejecer los pilosos ratones, desarrollaron tumores benignos semejantes a un tumor común del cuero cabelludo humano llamado pilomatricoma. El laboratorio de Fuchs no tardó en demostrar que estos tumores se desarrollan en el hombre cuando una mutación en el gen de la beta-catenina impide que la proteína se degrade. Las Wnt y la beta-catenina en exceso han intervenido también en procesos cancerosos de colon, hígado, mama y aparato reproductor.

En opinión de Fuchs, todos estos resultados, incluso los desafortunados tumores de los ratones, proporcionan informaciones útiles para el tratamiento científico de los trastornos capilares. Nos enseñan que las Wnt ejercen una importante regulación del desarrollo y el ciclo folicular, pero que no puede admitirse como terapia humana la continua administración de Wnt por el riesgo de tumores. Para corregir las afecciones capilares, quizás habría que administrar esas proteínas de un modo que imitara mejor a la naturaleza, o manipular otras etapas de la cascada de señalizaciones Wnt.

Para conseguir esto, se necesita conocer mejor la vía señalizadora de las Wnt y otros factores presentes en la piel. Saber cuáles Wnt y cuáles de sus numerosos receptores participan en las diferentes etapas del ciclo piloso y en el desarrollo folicular, y cuáles son las moléculas que controlan su producción. Y también qué moléculas del interior de las células objetivo de las Wnt determinan el modo de respuesta de tales células a las proteínas Wnt, por ejemplo, su conversión en células pilosas o en otras partes del folículo.

## CALVICIE Y CARDIOPATIAS

En los últimos 10 años varios estudios han sugerido que la calvicie tal vez sea algo más que una incomodidad: podría ser indicio de un mayor riesgo de afecciones cardíacas. En el pasado año confirmó tal idea el más amplio estudio realizado hasta la fecha.

La investigación, dirigida por JoAnn E. Manson de la Escuela Médica y Hospital Femenino de Harvard, examinó los participantes en el Estudio Sanitario de los Médicos, un proyecto a largo plazo que examinaba los riesgos de trastornos cardíacos en unos 22.000 médicos varones. Transcurridos once años del proyecto, los médicos, comprendidos entonces entre los 51 y 95 años, indicaron entre cinco imágenes cuál se aproximaba más a su configuración de cabello cuando tenían 45 años. La mayoría de los varones que se quedan calvos pierden el pelo en una secuencia típica, aunque a diferente velocidad. Primero, el perfil del cuero cabelludo retrocede hacia las sienes. A continuación, empieza a caerse el cabello de la coronilla. Después, el perfil del cabello retrocede más aún y los claros de la coronilla crecen hasta que las dos zonas se unen.

Manson y sus colegas establecieron una correlación entre las configuraciones de cabello y los trastornos cardíacos aparecidos en 19.112 sujetos que al iniciarse el Estudio Sanitario no habían tenido problema cardiovascular alguno. Los médicos que fallecieron durante el período de 11 años no se tuvieron en cuenta, de manera que no pudo asegurarse la conexión entre la calvicie y los ataques fatales al corazón. Pero los investigadores podían examinar la relación entre la pérdida de cabello y otros "accidentes coronarios", es decir, ataques cardíacos no fatales, anginas o tratamientos de cardiopatías (cirugía de derivación o angioplastia).

Cuando se eliminaron influencias capaces de crear confusión, los resultados demostraron que, a cualquier edad, los varones afectados de calvicie frontal estaban sólo algo más expuestos (un 9 por ciento) a los problemas cardíacos que los que habían conservado todo el cabello. En cambio, el riesgo de sufrir del corazón era un 23 por ciento mayor en los que tenían ligeramente despoblada la coronilla, proporción que se elevaba al 30 por ciento si la coronilla estaba parcial o totalmente calva.

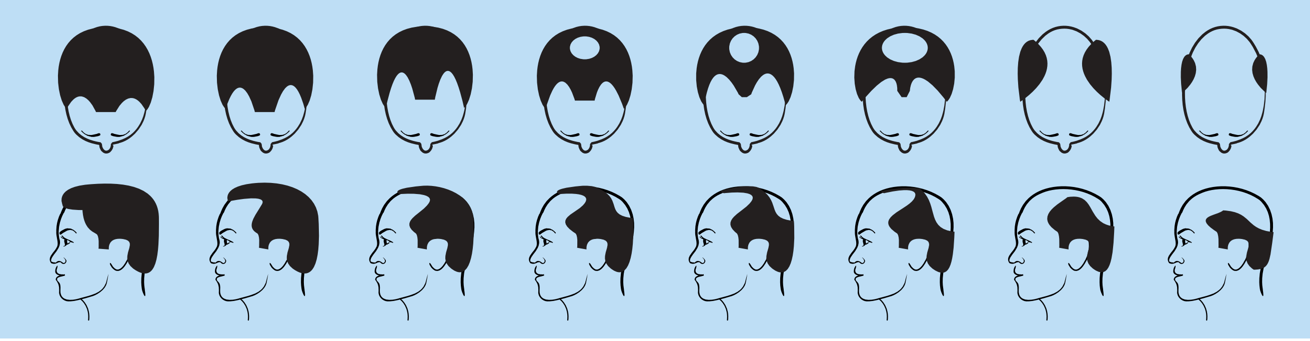
El riesgo mayor se daba en los varones muy calvos con tasas de colesterol elevadas o alta presión sanguínea. Los de colesterol alto estaban casi tres veces más expuestos a las afecciones cardíacas que los de idéntica condición pero con su cabellera intacta. Los individuos calvos hipertensos corrían casi el doble de riesgo que sus homólogos de lozano cabello.

Sólo cabe especular sobre la razón de la mayor proclividad de los varones calvos a las cardiopatías. La culpa podría ser de la herencia genética, de los niveles elevados de hormonas masculinas (andrógenos) o de una mayor sensibilidad a las mismas. Los andrógenos intervienen en el tipo masculino de calvicie y aparentemente contribuyen a la arteriosclerosis y a aumentar el índice de coagulación de la sangre, causas ambas de enfermedad cardíaca.

La calvicie no produce ataques al corazón, pero sí puede recordarnos que han de tomarse medidas preventivas. La receta es ya familiar: no fumar, hacer ejercicio con regularidad, comer adecuadamente y mantener los niveles de presión sanguínea y colesterol en el margen normal.

¿Protegerán también contra afecciones cardíacas los fármacos que pretenden evitar la caída del cabello? Manson recibió el año pasado una avalancha de mensajes que formulaban esa misma pregunta. A todos respondió igual: por desgracia, no hay prueba alguna en tal sentido.

**EL MODELO DE CLASIFICACION NORMAL para la progresión de la calvicie de tipo masculino, la escala de Norwood-Hamilton, comprende las cabezas aquí representadas. Hay una disposición menos típica (no ilustrada), en la que va retrocediendo el perfil frontal del cabello, pero nunca se forma una calva separada. El estudio cardiológico anterior presenta una versión simplificada de esta escala.**



La investigación sobre vías de señalización que interactúan con la trayectoria de las Wnt habrá de ofrecernos algunas pistas para responder. En tales vías se han descubierto múltiples proteínas: sonic hedgehog, el factor beta transformador del crecimiento, proteína morfogénica del hueso, noggin y factor de crecimiento del fibroblasto, por citar sólo unas cuantas.

La proteína sonic hedgehog podría desempeñar un papel esencial en el desarrollo del pelo. A semejanza de las proteínas Wnt, transporta una señal de una célula a otra y se sabe que participa en el correcto desarrollo de los embriones. Además, es frecuente que las vías de señalización de la sonic hedgehog y las Wnt se influyan entre sí. Aunque la sonic hedgehog no sea necesaria para la formación del germen piloso, sí lo es para la conversión subsiguiente del germen a folículo plenamente abierto. En el año 2000 Ronald G. Crystal, de la Universidad de Cornell, en-

## FARMACOLOGIA CAPILAR por Mia Schmiedeskamp

Cuando la pérdida de pelo —masculina y femenina— sigue un patrón clásico, la alopecia androgenética, los folículos se miniaturizan y se abrevia su fase de crecimiento, produciendo entonces unos cabellos finos y extremadamente delgados. "A los más calvos todavía les quedan pequeños cabellos en lo alto de la cabeza", afirma Bruce Morgan, del Centro de Biología Cutánea de Harvard. En un caso más raro, la alopecia areata (que afecta sólo a un 2 por ciento de la población), la fase de crecimiento folicular termina prematuramente por un ataque autoinmunitario que hace caer el cabello por zonas y, en casos extremos, por todo el cuerpo. Pero aquí también sobreviven los folículos.

El tratamiento típico de la alopecia areata se centra en reprimir el díscolo sistema inmunitario, pero el tratamiento de la caída de pelo en hombres y mujeres debe aumentar el tamaño de unos folículos liliputienses y además la longitud del cabello. Minoxidil —introducido como Rogaine en 1988— fue el primer fármaco aprobado en los Estados Unidos para ese fin y es el único autorizado para utilizarse en ambos sexos. Se disputa sobre la manera en que el minoxidil, en aplicación tópica, alarga y fortalece el cabello. Tal vez sea porque aumenta el suministro sanguíneo, alimentando mejor los folículos, o quizá porque altera las concentraciones celulares de las sustancias que regulan el crecimiento capilar.

El mecanismo del segundo fármaco aprobado, finasteride, es más claro. Comercializado como Propecia para remediar la pérdida de pelo en hombres



contró que, cuando se induce a los folículos pilosos de ratones adultos a que produzcan esta proteína durante la fase de reposo, el telógeno, esos folículos pasan prematuramente a la fase de crecimiento, o anágeno. De este modo, la sonic hedgehog puede estimular los folículos aletargados para que empiecen a producir pelo.

Pese al atractivo que encierra la inducción de crecimiento capilar mediante la proteína sonic hedgehog, conviene no olvidar que el exceso de señalización por esta molécula da lugar a cánceres de piel en células basales humanas. Para desarrollar terapias en las que intervengan proteínas sonic hedgehogs, Wnt u otras capaces de provocar la división celular, hay que asegurarse de que esas moléculas estén adecuadamente controladas.

Se comprueba que es difícil evitar los efectos sobre la señalización Wnt de las proteínas morfogénicas óseas y de las diferentes formas del factor beta transformador del crecimiento. Pero algunos aventuran que, una vez terminada esa tarea, estas proteínas también podrían resultar útiles para detener o iniciar el crecimiento del cabello.

### Terapia

Identificar la multitud de moléculas que coordinan el desarrollo y los ciclos de los folículos pilosos constituye una tarea titánica. Gracias al veloz ritmo de los avances técnicos se podrá, no obstante, en plazo breve discernir todos los genes que se activan en las diferentes etapas del desarrollo y ciclos foliculares en poblaciones purificadas de células. Con tal información disponible, será posible averiguar por qué se alteran estos complejos patrones de actividad genética en las personas aquejadas de trastornos capilares. Los biólogos se valdrán de nuevas técnicas para descubrir otras proteínas de interés en la producción del pelo y además señalar cuáles son las que contribuyen a los diferentes desarreglos.

Al profundizar en el conocimiento de las interacciones moleculares que sirven de base al creci-

(y como Proscar en dosis más concentradas contra el agrandamiento de la próstata), se administra por vía oral. En el cuerpo inhibe una enzima que convierte la testosterona en dihidrotestosterona (DHT), con lo cual reduce la producción de esta última sustancia. La DHT es muy importante para el desarrollo de los fetos masculinos, pero después puede crear problemas. Estimula algunos folículos para producir pelos largos y gruesos (en la mejilla y mentón, por ejemplo) y ello provoca un enrarecimiento de cabellos en la cabeza de personas susceptibles, a veces ya antes de la adolescencia. Algunos sospechan que la DHT perturba los folículos pilosos al actuar sobre la papila dérmica, alterando su producción de sustancias que influyen en el crecimiento capilar.

Según un estudio de 1998 realizado sobre más de 1200 varones entre 18 y 41 años con pérdida de pelo débil a moderada, alrededor del 83 por ciento mantenían el pelo que coronaba su cabeza al cabo de dos años de aplicarse finasteride. Más de la mitad notaron al menos una ligera repoblación de cabellos. Pero, en palabras de Jerry Shapiro, director del Centro de Investigación y Tratamiento del Cabello de la Universidad de la Columbia Británica, "lo que más trabajo cuesta es mantener unos adecuados niveles de expectativa en los pacientes, de manera que no esperen tener una cabellera frondosa. Se ha de hacer hincapié en la prevención. También cabe la posibilidad de un nuevo crecimiento, pero no se ha de resaltar, sobre todo en hombres con fuerte pérdida de pelo".

Los varones pueden esperar resultados similares con minoxidil al 5 por ciento, advierte Marty Sawaya de ARATEC, quien dirige ensayos clínicos para diversas compañías. Según ella, del 25 al 30 por ciento de los hombres consiguen una repoblación entre moderada y densa con uno u otro producto. Algunos juegan ambas cartas: minoxidil sin receta y finasteride con receta. En los macacos rabicortos los dos fármacos unidos dan mejor resultado que uno solo de ellos.

Para la pérdida de pelo femenina, sólo el minoxidil al 2 por ciento ha conseguido ser aprobado por la FDA. Cerca del 60 por ciento de las mujeres consiguen con esta dosis mantener su cabello y repoblarlo en cierta medida. Las que se enfrentan al problema opuesto, el indeseado crecimiento de vello facial, disponen hoy de una solución aprobada por la FDA: la aplicación tópica de crema de eflornitina, Vaniqa en el mercado, que inhibe una enzima necesaria para la proliferación celular y, por tanto, retarda el crecimiento de vello. Pero una vez más, no deben exagerarse las expectativas. Alrededor del 58 por ciento de las féminas notan una ligera mejoría o algo más al cabo de un par de meses. La crema retarda el crecimiento piloso pero no lo detiene, por lo que las mujeres en tratamiento continúan depilándose con pinzas o cualquier otro procedimiento.

### Mirar hacia delante

La investigación realizada en los laboratorios farmacéuticos se mantiene secreta hasta que los específicos propuestos han superado las pruebas clínicas. Empero es probable que los próximos tratamientos capilares que aparezcan se apoyen en principios familiares. Varias firmas han desarrollado moléculas que inhiben la misma enzima que el finasteride. Hoechst AG ha probado en laboratorio un fármaco que sería aplicado al cuero cabelludo para bloquear la unión de DHT a las células de folículos pilosos. Y Bristol-Myers Squibb ha empezado los ensayos clínicos de un fármaco que supuestamente va a comportarse de modo similar al minoxidil.

Quizás el producto más prometedor para ensayos humanos sea el dutasteride, de GlaxoSmithKline. Igual que el finasteride, inhibe la enzima que produce la DHT, pero bloquea dos formas de la enzima en lugar de una.

Michael Detmar, de Harvard, descubrió a principios de este año que la abundancia de un factor de crecimiento aumenta el aflujo sanguíneo que hace crecer el pelo más deprisa y con mayor grosor. Ahora lo que se busca son pequeñas moléculas que imiten ese factor o lo activen. Pero nos hallamos muy lejos de encontrar fármacos de ese tipo u otros concebidos para interactuar con moléculas que regulen directamente el crecimiento capilar, tales como las Wnt o la beta-catenina.

miento piloso, podrán iniciarse los ensayos en animales de fármacos capaces de restaurar el orden en trayectos de regulación alterados y revivir folículos aletargados. Si los ensayos dieran resultado, podría trasplantarse cuero cabelludo humano a ratones incapaces de rechazarlo, con el fin de determinar si los folículos humanos y de ratones responden de un modo similar a los agentes. Y en el caso más favorable, se podrían intentar ensayos en seres humanos de los fármacos que ofrezcan mejores expectativas.

Se ignora cuándo podrán los dermatólogos y los laboratorios farmacéuticos elaborar nuevas terapias que se apoyen en los descubrimientos aportados por la investigación básica sobre el desarrollo y los ciclos foliculares. Pero la investigación avanza con notable rapidez. Es probable, confían algunos, que en los próximos cinco años dispongamos de gran parte de la información necesaria para comprender los complejos controles que regulan la génesis del pelo.

## Bibliografía complementaria


THE BIOLOGY OF HAIR FOLLICLES. Ralf Paus y George Cotsarelis en *New England Journal of Medicine*, vol. 341, n.º 7, págs 491-497; 12 de agosto de 1999.

MULTIPLE ROLES FOR ACTIVATED LEF/TCF TRANSCRIPTION COMPLEXES DURING HAIR FOLLICLE DEVELOPMENT AND DIFFERENTIATION. Ramanuj Das Gupta y Eelaine Fuchs en *Development*, vol. 126, n.º 20, págs. 4557-4558; 1 de octubre de 1999.

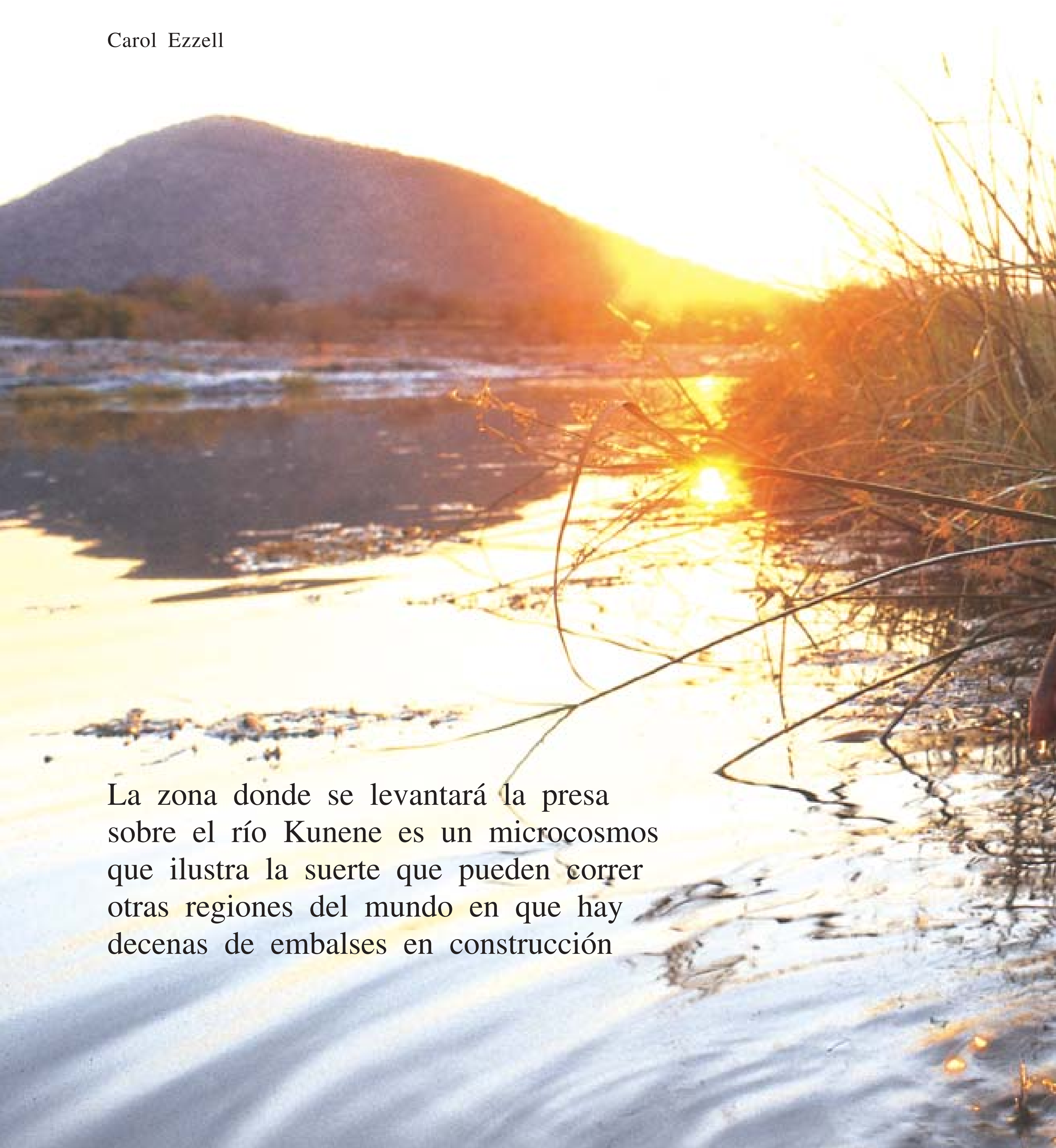
STEM CELLS: A NEW LEASE ON LIFE. Elaine Fuchs y Julia A. Segre en *Cell*, vol. 100, n.º 1, págs. 143-145; 7 de enero de 2000.

INVOLVEMENT OF FOLLICULAR STEM CELLS IN FORMING NOT ONLY THE FOLLICLE BUT ALSO THE EPIDERMIS. G. Taylor, M. S. Lehrer, P. J. Jensen, T. T. Sun y R. M. Lavker en *Cell*, vol. 192, n.º 4, págs. 451-461; 18 de agosto de 2000.

MORPHOGENESIS AND RENEWAL OF HAIR FOLLICLES FROM ADULT MULTIPOTENT STEM CELLS. H. Oshima, A. Rochat, C. Kedzia, K. Kobayashi e Y. Barrandon en *Cell*, vol. 104, n.º 2, págs. 233-245; 26 de enero de 2001.

# Los himba y la presa hidroeléctrica

Carol Ezzell



**La zona donde se levantará la presa sobre el río Kunene es un microcosmos que ilustra la suerte que pueden correr otras regiones del mundo en que hay decenas de embalses en construcción**



1. JAKATUNGA TJIUMA, uno de los jefes himba de Namibia, se lava las manos en el río Kunene, donde se proyecta construir una presa hidroeléctrica.

Sólo cuando hemos subido a la cima desde donde se domina el curso del Kunene —río fronterizo entre Angola y Namibia— se percata el jefe tribal Jakatunga de la enormidad de la presa proyectada. “Mire allá”, le digo con la ayuda de un intérprete, señalando hacia un estrechamiento del cauce, punto ideal según los ingenieros para levantar el dique. Dándome luego la vuelta, apunto a las colinas del este. “Y el agua retenida por la presa formaría un lago que llegaría hasta allí.” Veo en sus ojos una mezcla de asombro e incredulidad a medida que empieza a comprender cuánto subiría el agua por la falda de las colinas anegando más de 350 kilómetros cuadrados del territorio himba, sus pastizales y las tumbas de sus antepasados. Aprieta sobre los hombros su manto y se sienta en una roca sin decir palabra.

Tjiuma es consejero de uno de los jefes de la tribu himba, pueblo autosuficiente formado por 16.000 personas que llevan una austera existencia en el árido y rocoso noroeste de Namibia, viviendo de la leche y la carne de sus vacas y cabras, más algún que otro melón o calabaza. A los himba se les llama también el Pueblo Rojo, porque recubren su cuerpo, cabello y cuero de su indumentaria de un empaste de manteca y polvillo de ocre ferroso. Refieren ellos que usan tal mixtura por motivos estéticos; lo cierto es que también les protege la piel contra la aridez del clima.

Han vivido durante décadas en relativo aislamiento. Ninguna otra tribu les envidiaba su tierra ingrata. Los alemanes que colonizaron la zona a finales del siglo XIX raras veces entraron en contacto con ellos. Más recientemente, los principales contactos exteriores de los himba fueron con soldados durante la guerra que sostuvo Namibia para independizarse de Sudáfrica (lo que logró en 1990), con guerrilleros de la inacabable guerra civil de Angola y con la ocasional caravana de turistas norteamericanos o europeos. Pero si el gobierno namibio lleva adelante sus planes, para el año 2008 se habrán establecido más de 1000 trabajadores forasteros en un poblado provisional justo al pie del Salto de Epupa, que es el lugar del río en que el gobierno se propone construir la presa. Con ellos vendrán la economía dineraria, el alcohol, la prostitución y el sida... junto, eso sí, con buenas carreteras, progresos sanitarios, escuelas y hasta puede que electricidad.

La situación en torno al proyectado embalse del río Kunene cabe considerarla como un microcosmos entre los proyectos de embalses que en todo el mundo están afectando a los pueblos indígenas. Según una inspección realizada por la Comisión Mundial sobre Embalses, que emitió su último informe el pasado noviembre, 68 de los 123 embalses estudiados desplazarían pueblos, incluidas tribus que han tenido poco contacto previo con la civilización. El proyecto más ambicioso, la descomunal Presa de las Tres Gargantas en el río Yang-tzé, obligará a desplazarse a más de dos millones de chinos. Los embalses suelen alterar, para bien o para mal o en fuerte combinación de ambas cosas, las formas de vida y las culturas de las poblaciones locales.

¿Cómo ha de estimar la sociedad mundial el derecho de esas poblaciones a que se las deje en paz, frente a la necesidad, a veces muy real, que los países en vías de desarrollo tienen de sacar ventajas de sus recursos? ¿Deberán tales países gozar de autonomía para decidir qué es lo que verdaderamente interesa más a todos sus ciudadanos, aunque algunos de ellos no deseen cambiar? Y quizá lo más importante, ¿cómo pueden los pueblos tradicionales decidir por sí mismos estas cuestiones cuando sólo tienen a lo sumo una ligera idea de cómo viven las sociedades más desarrolladas y de lo que sería ponerse ellos a su altura?

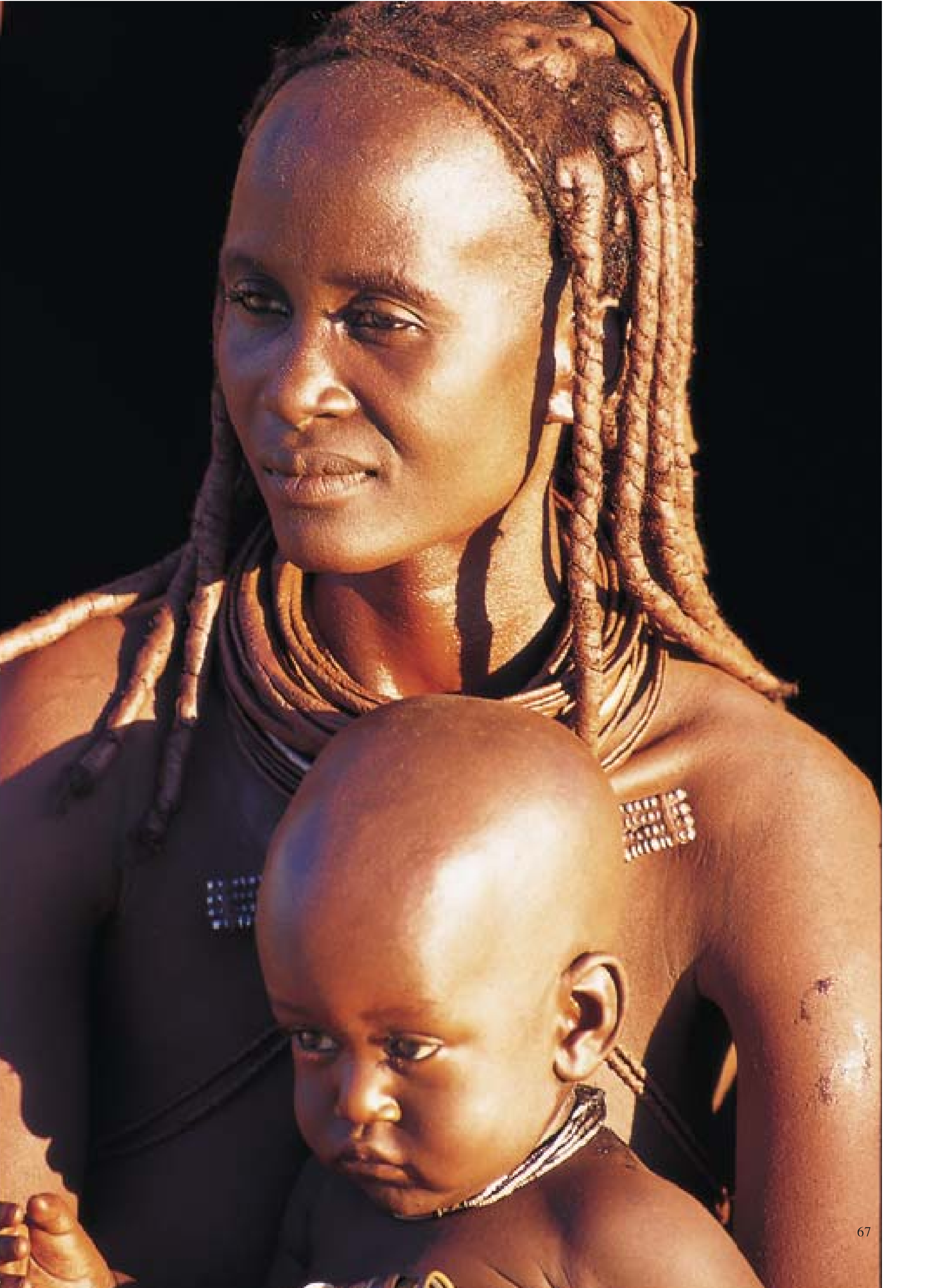
## En el desierto

Kaokolandia, el rincón de Namibia donde viven los himba, es en verdad el extremo del mundo. Llegamos al Salto de Epupa, la modesta cascada que quedaría engullida por el embalse, dos días después de haber dejado la última carretera alquitranada. Nuestro camión soporta una heterogénea y pesada carga: bidones de gasolina (el surtidor más próximo quedó una jornada atrás), cajas de agua embotellada, neumáticos de repuesto, botiquín de emergencia, equipo de acampada, amén de tabaco, azúcar, mantas y vestidos para regalarlos. Encima de todo va bien atada una flamante bicicleta, que es el pago que ha exigido Staygon Reiter, nuestro intérprete himba, por sus servicios, aunque no sé cómo podrá arreglárselas para andar en bicicleta por un terreno tan áspero e inhóspito. Exigió un modelo con un portaequipajes capaz de llevar una cabra.

Avanzamos lentamente, con mil sacudidas y traqueteos por los múltiples baches, siguiendo borrosas sendas y procurando no caer en mayores hoyos y evitar que el choque con algún pedrusco nos reviente los neumáticos. Más de una vez, al atravesar el cauce seco de un río, nos atascamos en la arena, patinando silbantes las ruedas hasta que nos apeamos para desinflarlas un poco o para poner ramos y colocarlas en tracción. Nos detenemos unos instantes a observar un escorpión de gran tamaño que se cruza en nuestro camino; yo comento que he visto langostas más pequeñas.

El paraje del Salto de Epupa, donde acampamos, es una especie de cruce de caminos, una tierra de nadie en la que los himba namibios suelen encontrarse con sus parientes angoleños de allende el río y con los individuos de otras tribus tales como los herero, con quienes los himba están muy emparentados, y los zemba, los thwa y los ngambwe. Hay allí una iglesita de techo pajizo construida por mi-

**2. EL ROJIZO BRILLO DE LA PIEL de esta madre himba y de su criatura se debe a la mezcla de manteca y polvillo de ocre ferruginoso con la que acostumbran embadurnarse. Como otras mujeres adultas, esta madre se afeita la parte delantera del cuero cabelludo y se hace varias trenzas que reboza con una mixtura de barro. A los niños, hasta el destete, les afeitan la cabeza.**



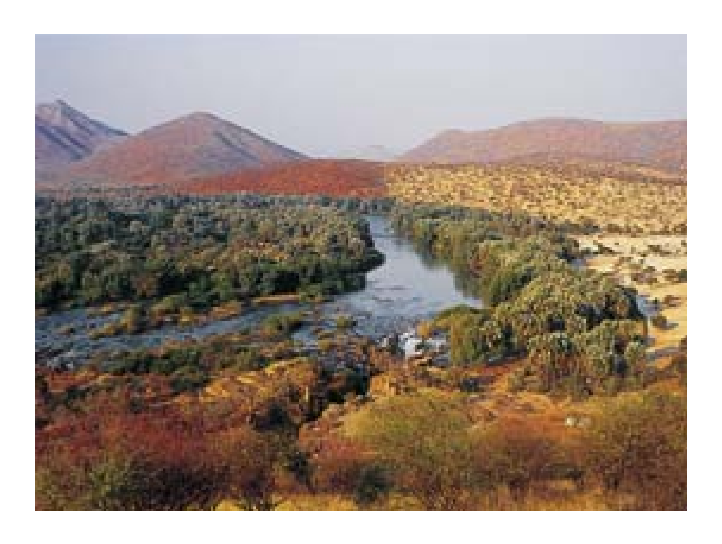
sioneros, un pequeño pero lujoso campamento safari, un almacén edificado con onduladas planchas metálicas en el que lo que más se vende es tabaco barato, maíz y algunos refrescos, y hay, en fin, un recinto de acampada donde los viajeros podemos instalar una tienda bajo un *omerungu*, árbol parecido a la palmera, pagando 50 dólares namibios (unas 1200 pesetas) por noche. Casi nadie vive permanentemente en este sitio: los himba pasan ahí cada vez unas pocas semanas o unos meses, instalando chozas provisionales para asistir a funerales, repartir herencias, vender ganado o hacer otros negocios y visitar a amigos y parientes.

Nuestra primera etapa consistía en procurar un encuentro con el jefe Hikuminwe Kapika en su posesión cercana al Salto de Epupa, que es parte del territorio controlado por él. En seguida se hace evidente que Kapika —uno de la decena de jefes himba— se muestra hermético a la hora de hablar del propuesto embalse con forasteros pero muy deseoso de que apreciemos la importancia de su rango. Por lo canoso de sus cabellos y lo avejentado de su rostro conjeturo que debe de tener más de 70 años, aunque como los himba no saben de calendarios, ignoran en qué año nacieron. Hemos de estarnos de plantón ante su blanca silla metálica de campaña (la única que hay en su recinto), espantándonos de las caras las moscas mientras trato yo de captar la atención del hombre el tiempo suficiente para que responda a mis preguntas. Durante la entrevista escupe varias veces a través del hueco que en su dentadura le hicieran cuando diezañero, arrancándole según la tradición himba los dos incisivos inferiores centrales y limándole los dos superiores para crear una abertura en forma de V. Con el fin de demostrarnos que es persona muy ocupada sigue cosiéndose un taparrabo de tela negra e interrumpe a nuestro intérprete para reprender a unos chiquillos que alborotan.

Al fin Kapika manifiesta su cerrada oposición contra el embalse propuesto. Teme que la gente que venga a construir la presa robe el ganado himba, temor no falto de razón, pues a finales del siglo XIX los himba estuvieron al borde de la extinción a manos de la tribu sureña nama, que les atacó para robarles ganado. Y robos de ganado sigue habiéndolos hoy. También le preocupa que los recién llegados vayan a apoderarse de los mejores pastizales, de aquellos que los himba se cuidan mucho de no usar en exceso. Los grupos de familias trasladan sus asentamientos varias veces cada año para facilitar la recupe-





**3. EL RIO KUNENE traza la frontera noroeste entre Angola y Namibia; los himba viven en la rocosa y árida región llamada Kaokolandia (*arriba*). El jefe de tribu Tjiuma (*en medio*) señala hacia el sitio (1 *en el mapa de arriba*) que el gobierno namibio prefiere como más idóneo económicamente para construir la proyectada presa. El lugar se halla aguas abajo del Salto de Epupa (*foto inferior*), el cual sería anegado por el embalse que se formaría tras el muro de la presa. La inundación de estos terrenos eliminaría las *omerungu*, de cuyos frutos depende la subsistencia de los himba en tiempos de sequía. El gobierno de Angola prefiere que se construya la presa en otro sitio más lejano río abajo, en los montes Bayne (2 *en el mapa*), pues ello obligaría a reparar otra presa que fue dañada durante la guerra civil.**

ración de los pastos. La zona en torno a la posesión de Kapika ilustra la necesidad de tal procedimiento conservador, pues sus vacas y cabras han comido ya cuanto tenían a su alcance, dejando los arbustos y los árboles con muy escaso follaje en lo más alto de los troncos.

Los dirigentes himba se oponen también al pantano porque éste inundaría centenares de tumbas, que desempeñan una función central en las creencias religiosas y en la estructura social de su tribu. En tiempos de crisis, los patriarcas de las familias consultan a los antepasados en el transcurso de especiales ceremonias que se celebran en los cementerios y las tumbas sirven a menudo para dirimir disputas sobre el acceso a los terrenos. El territorio es de propiedad comunal, pero cada establecimiento permanente es guardado por un "poseedor de la tierra", usualmente el hombre más viejo de la familia que ha vivido más tiempo en ese lugar. Para decidir quién puede apacentar su ganado en una zona determinada, los himba comparan el número de antepasados que tienen allí enterrados y preguntan: "¿Qué tumbas son más antiguas, las nuestras o las suyas?"

Kapika dice que los himba se resistirán y lucharán "con piedras y lanzas" si el gobierno namibio intenta construir una presa hidroeléctrica en el Salto de Epupa. "Yo soy un hombre importante", nos asegura. "Soy un hombre que puede vivir de lo suyo."

## Si la hacen nos hunden

¿Cómo arreglárselas para describir una gran presa hidráulica a alguien que no tiene ni idea de la electricidad? ¿O para describirle una construcción mucho más alta que una casa de un solo piso? La presa proyectada para el Salto de Epupa tendría una altura de 163 metros, sólo 4 metros y medio menos que la imponente del Gran Barranco en el estado de Washington. Generaría 360 megawatt de electricidad diarios y costaría más de 500 millones de dólares estadounidenses.

Una presa próxima al Salto de Epupa fue ya proyectada en 1969; Namibia era todavía territorio de Sudáfrica. La idea no se llevó a la realidad, pero resurgió en 1991, al año de independizarse Namibia, cuando ésta y Angola encargaron a una comisión el estudio de la viabilidad de aquel proyecto. El informe resultante consideraba dos posibles emplazamientos para la presa: el Salto de Epupa y un lugar de los montes Baynes situado mucho más río abajo. Concluía que en el Salto de Epupa sería más económica la construcción, pero Angola prefería los Baynes porque hacer allí una presa significaría que el país iba a obtener también fondos para reparar, en un tributario angoleño, otra presa que fue dañada durante la guerra civil. El coste de ésta es una razón de que el emplazamiento Baynes resultara más caro.

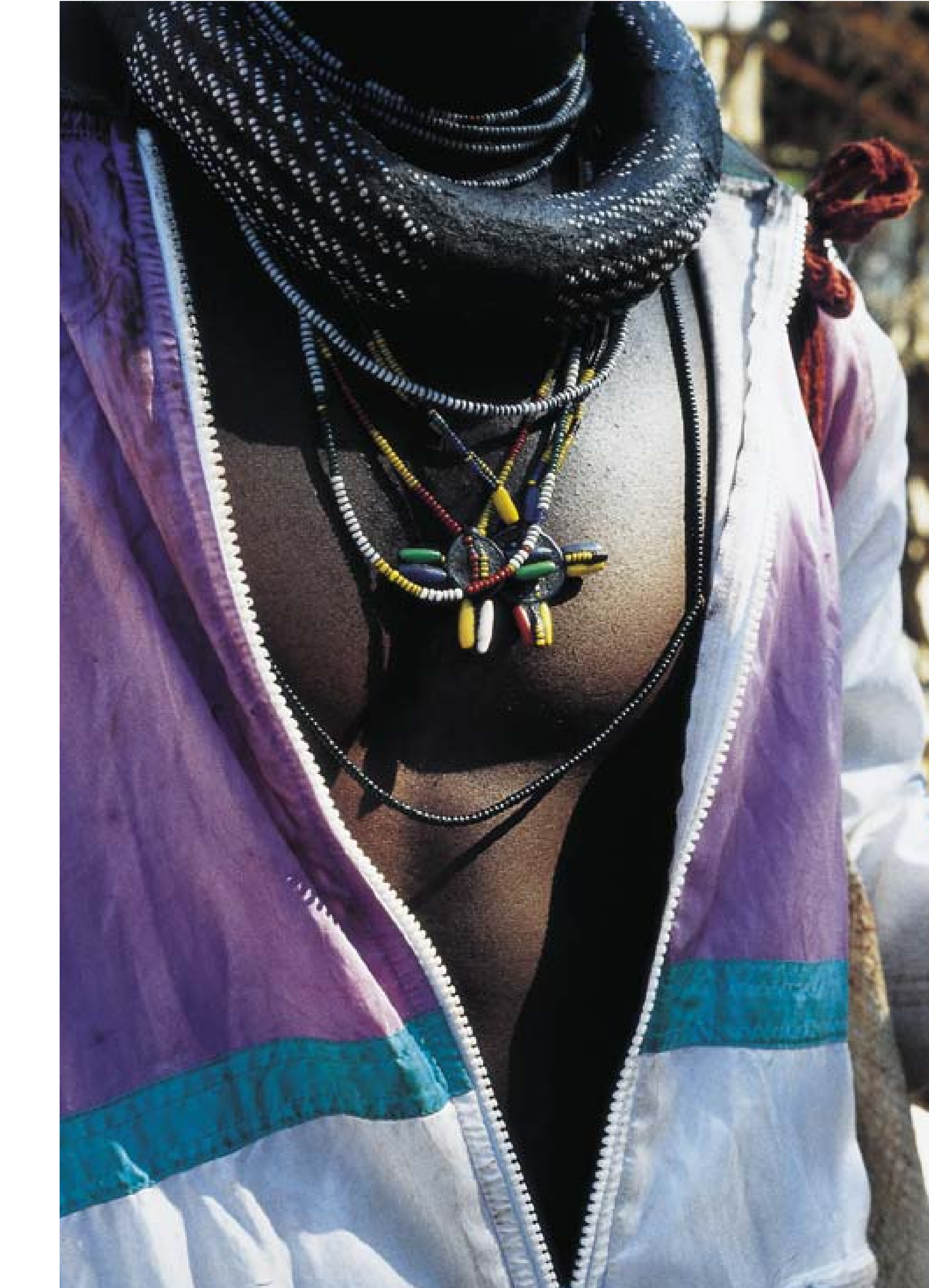
Cuando los consultantes del estudio acudieron a discutir el proyecto de presa con los himba, los dirigentes de la tribu no tuvieron al principio nada que objetar, pues pensaron que iría a ser un pequeño terraplén como los que ellos solían levantar para dirigir el agua hacia los abrevaderos de sus ganados. Lo grave de la incomunicación tardó algún tiempo en evidenciarse. Margaret Jacobsohn, de Desarrollo Rural Integral y la Conservación de la Naturaleza, una periodista namibia convertida en antropóloga que trabajaba en la parte del estudio de viabilidad tocante al impacto social, recuerda un significativo incidente ocurrido a los pocos meses de iniciarse el proceso. Fue ella a visitar a una familia himba cuyo cercado estaba cerca del Salto de Epupa y empezó a preguntarles qué opinaba sobre la proyectada presa. Extrañamente, no parecían saber nada al respecto, aunque el gobierno namibio le había dicho a ella que aquellas gentes habían sido informadas. Cuando terminó de hacerles preguntas, un miembro de la familia le pidió que les ayudara a descifrar un misterioso papel que habían recibido algún tiempo antes. En el sobre que aquel hombre sacó de su choza, manchado de ocre y que nunca habían abierto, vio ella que había una carta escrita en inglés explicando lo de la presa. Así que se la hubo traducido, un anciano de la familia exclamó moviendo pesaroso la cabeza: "Está usted hablando de acabar del todo con los himba."

## Cómo viven los himba

Los himba, una de las últimas tribus aferradas a sus costumbres y tradiciones, son por lo general autosuficientes, viven total o parcialmente aislados del resto del mundo. A los antropólogos les parecen los himba especialmente interesantes porque siguen un sistema genealógico bilateral. Cada miembro de la tribu pertenece a dos clanes, a uno por el padre (clan patriarcal) y a otro por la madre (clan matriarcal). Las tribus que se atienen a la descendencia bilateral son raras: además de entre los himba, esta costumbre se da sólo en unos pocos pueblos del Africa Occidental, de la India, de Australia, de Melanesia y de Polinesia.

Cada clan patriarcal himba está regido por el hombre más anciano de la familia. Los hijos viven con el padre; después del matrimonio, las hijas dejan la casa paterna para unirse a la familia de sus maridos y pasan a ser miembros del clan patriarcal de éstos. Pero la herencia de los bienes materiales —el ganado en el caso de los himba— depende del clan matriarcal. Así que un hijo no hereda el ganado de su padre, sino el de su tío materno.

La descendencia bilateral resulta ventajosa para las tribus que viven en ambientes precarios, como lo es la región árida de los himba; pues el sistema bilateral hace que, en las crisis de sequía y escasez, cada individuo pueda contar con la ayuda de dos parentelas diseminadas por distintas zonas. El sistema sirve también para aminorar los inconvenientes de la endogamia en la ganadería de los himba. Varios clanes patriarcales tienen tabúes que prohíben a sus miembros poseer vacas o cabras de determinado color o tipo de pelaje, y, si les nacen algunas que violan los tabúes del clan patriarcal, han de canjearlas con las de otro clan patriarcal.



La religión de los himba presenta también una organización bilateral y el individuo la practica por mediación de su clan patriarcal. Los himba reconocen una deidad creadora, pero esta entidad está muy alejada de los asuntos humanos y sólo se le pueden elevar súplicas invocando a los antepasados paternos para que actúen como intercesores. Las observancias religiosas de la tribu giran en torno a unos fuegos sagrados encendidos primero junto a las tumbas de los ancestros y mantenidos después por el jefe de cada clan patriarcal en el campamento familiar.

El fuego sacro es pequeño, a menudo sólo unas ascuas rodeadas de unas piedras, y siempre lo ponen entre la abertura de la choza del jefe y el corral en que se recoge el ganado por la noche. Esa zona del cercado la consideran sagrada: los extraños no pueden pasar entre el fuego sacro y el corral, ni entre el fuego sacro y la choza del jefe si no piden antes permiso. Tradicionalmente, el cabeza de familia mantiene vivo el fuego durante el día y se sienta a su vera para comunicarse con los antepasados y consultarles sobre todos los problemas a que se enfrenta el grupo familiar. Por la noche, la esposa del jefe recoge un tizón y lo introduce éste en la choza principal; al amanecer, el fuego es llevado otra vez al hornillo exterior.

Los himba interesan también a los antropólogos por el rápido cambio social de sus sujetos. El vestido refleja esa transformación. Muchos varones han adoptado la vestimenta y los estilos de peinado occidentales. En el Salto de Epupa, donde ocasionalmente contactan los himba con forasteros, puede verse a un varón himba llevar un día el torso desnudo y el mandil y los adornos himba, y vestirse al día siguiente con pantalones y camisa. Pocos jóvenes se ponen allí la "cola de caballo de la soltería", prenda tradicional para los hombres no casados, y aún son menos los maridos que siguen la costumbre de no cortarse el cabello y de cubrirse la cabeza con un trapo. Y lo que es rarísimo es ver en los Saltos de Epupa a algún hombre embadurnado con ocre; por cierto que muchos se lavan a diario en el río Kunene y con jabón.

Las mujeres himba son mucho más conservadoras en cuanto al vestido. Hasta en el Salto de Epupa la mayoría de las mujeres llevan los senos desnudos, visten sayuelos de piel de ternera o de cabra, se embadurnan cada mañana generosamente de la cabeza a los pies con la mezcla de manteca y arcilla ocrosa, y casi nunca emplean el agua para lavarse. Las jovencitas se hacen con el cabello dos gruesas trenzas que les adornan la frente y el rostro, mientras que las mujeres maduras ostentan una cascada de largas y finas trenzas, cada una de las cuales las recubren con una mixtura arcillosa que al secarse forma una costra rígida.

**4. EN EL ATUENDO de este joven himba que vive en un poblado próximo al Salto de Epupa se ven los efectos del contacto con otras culturas: junto al grueso collar tradicional entre los himba, lleva también los collarines multicolores de la tribu zemba y una deportiva parca acremallada de estilo y hechura occidental. Las mujeres himba han sido más reacias a cambiar su tradicional atavío, quizá porque tratan de conservar su identidad.**

Según los antropólogos, las mujeres himba no se adhieren sólo pasivamente a sus formas de vestir tradicionales, sino que actúan así rechazando el cambio porque ésa es la única manera como pueden conservar su prestigio y valía. Los hombres himba ganan ocasionalmente dinero prestando algún servicio o comerciando con su ganado, pero las mujeres himba no gozaron nunca de tales oportunidades. Conservando sus cuerpos embadurnados de ocre, sus trenzas y sus sayas de piel, están ellas empeñadas en lo que la moderna teoría antropológica denomina "cambio continuístico" o "conservadurismo activo". "Mantenerse claramente tradicional puede ser una estratégica —y muy racional— respuesta a las instancias de lo moderno", dice Margaret Jacobsohn.

El reciente informe de la Comisión Mundial sobre Embalses declara que los pueblos de organización tribal como los himba, sean o no conservaduristas activos, se ven con frecuencia atrapados entre una presa hidroeléctrica y un asentamiento inhóspito. El informe concluye que tales proyectos "no han tenido lo bastante en cuenta las especiales necesidades y vulnerabilidades de los pueblos y tribus indígenas" y añade que "a menudo no se han reconocido o considerado en los proyectos de presas y embalses los efectos que puedan tener estas construcciones sobre los pueblos de la zona". Pide en consecuencia un mejor aprovechamiento de las instalaciones hidroeléctricas existentes y aboga por que los países y entidades financiadoras internacionales basen sus decisiones de construir nuevos pantanos en acuerdos con las comunidades interesadas.

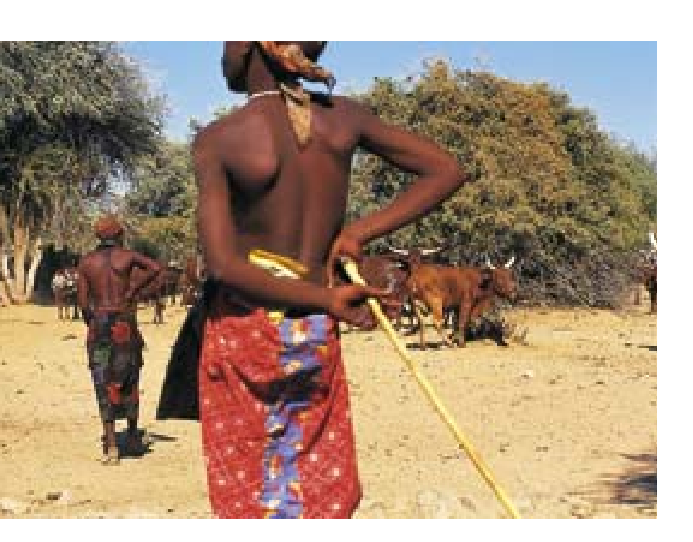
Pero en febrero último el Banco Mundial dijo que las directrices propuestas por la citada Comisión las tomaría sólo como "puntos de referencia" y no como normas vinculantes a la hora de financiar proyectos de grandes embalses. Un grupo de 150 organizaciones no gubernamentales procedentes de 39 países —entre ellos Namibia— contraatacó en marzo con una carta dirigida a James Wolfensohn, presidente del Banco Mundial, pidiéndole que reconsiderara aquella actitud y fijara una moratoria a la financiación de nuevos embalses hasta que el Banco se atuviera a las líneas directrices propuestas por la Comisión. Las organizaciones demandan que el Banco Mundial haga imparciales revisiones de los proyectos planeados y de los ya en realización y que fije reglas y procedimientos para resarcir a las gentes que hayan sido perjudicadas por anteriores embalses. E insinúan en la carta que si el Banco Mundial contribuyó, en 1998, con la Unión para la Conservación Mundial —IUCN— a crear la Comisión Mundial de Presas, fue tan sólo "con el fin de distraer a la oposición o para ganar tiempo". Y como la banca no corrija su postura, escriben, "quizás ellos se sientan menos inclinados a entablar en el futuro... diálogos con el Banco Mundial". Según la Comisión, la banca ha proporcionado cantidades que se estiman en 75.000 millones de dólares para la construcción de 538 grandes presas en 92 países.



Así las cosas, ¿qué decir de que se haga una presa en el Salto de Epupa? Jesaya Nyamu, ministro de minas y energía de Namibia, recalca que su país importa actualmente de Sudáfrica el 60 % de la energía que necesita y es una cuestión de soberanía nacional el suprimir semejante tara. "Pero nadie parece ver nuestra necesidad de independencia energética", se lamenta.

Arrellanado en el cómodo sillón de su oficina ministerial de Windhoek, capital de Namibia, el ministro tacha de entrometidas a las agrupaciones extranjeras defensoras del medio ambiente y las acusa de usar dos varas de medir: una para sus propios países industrializados y otra para los países que ellas consideran vírgenes y exóticos. "Toda Europa y toda América están llenas de embalses", dice Nyamu. "Esas gentes viven en sus países de energía hidroeléctrica."

En realidad, según los datos de la Comisión Internacional de Grandes Presas, los EE.UU. poseen, tras China, el mayor número de presas de más de 90 metros de altura. Y la experiencia norteamericana con respecto a las presas y a los pueblos indígenas es bien poco de alabar: la Presa del Gran Barranco inundó las tierras de los americanos nativos de las tribus colville y spokane y arruinó sus pesquerías de salmones. Las tribus reclamaron compensaciones en 1951, pero el gobierno tardó 43 años en resolver el proceso. En 1994 las tribus aceptaron una suma contante de 54 millones de dólares más un canon anual de 15 millones mientras el embalse siga produciendo electricidad.



Pero Katuutire Kaura, presidente del principal partido de la oposición de Namibia, sostiene que otra presa en el río Kunene "no es en absoluto necesaria". Una presa ya existente, construida en los años setenta río arriba, en Ruacana, está funcionando a menos del 20 % de su capacidad, indica este hombre. Y el yacimiento de gas recientemente descubierto en Kudu, cabe las costas meridionales de Namibia, se calcula que contiene 540.000 millones de metros cúbicos de gas natural, mucho más de lo que haría falta para cubrir las necesidades energéticas del país. "El yacimiento de Kudu puede estar dándonos gas durante veinticinco o treinta años", asegura Kaura. La compañía Shell Oil y el gobierno namibio trabajan actualmente en poner a punto la explotación de aquellas bolsas de gas.

Kaura añade que a los himba les llegarán pocos de los beneficios de la presa y en cambio pagarán altos costes. Como no están cualificados para trabajar en la presa, no se les contratará. También es improbable que del proyecto obtengan electricidad. Los habitantes de Opuwo, la ciudad más próxima a la presa de Ruacana, no recibieron la electrici-



**5. EN EL RECINTO DE UNA FAMILIA tradicional las mujeres y los niños se sientan al comenzar la mañana en torno al fuego (*arriba*) para quitarse el frío de la heladora noche del desierto. Los *erembes*, sombreretes de plisada piel de conejo, significan que las mujeres que los llevan están casadas. Los muchachos (*en medio*) vigilan el ganado familiar, que se apacienta durante el día. Entre los himba es el ganado un signo de riqueza; en muchos casos, cuando muere un rico, su familia mata docenas de sus reses, con cuyos cráneos se adorna luego la tumba (*abajo*), señalándose así la condición social del difunto. Esas tumbas —unas 160 de las cuales quedarán sumergidas cuando se haya construido la presa— son sitios en los que la tribu celebra importantes ceremonias rituales.**

**6. EL CAMBIO SOCIAL está ya llegando a los poblados próximos al Salto de Epupa. Una iglesia estadounidense tiene su centro misional cerca del río, en cuyas aguas suelen sus ministros bautizar a los himba que se convierten a la fe cristiana (*foto de arriba*). En una pequeña tienda (*en medio*) se venden productos alimenticios, principalmente harina de maíz, pero también se negocia al por menor con licores baratos y con cerveza. A veces algunos himba haraganean fuera de la tienda y piden dinero a los ocasionales turistas para comprar alcohol; el suelo de alrededor de la tienda está lleno de botellas y envases vacíos, algunos de los cuales vuelven a ser usados por otros himba para coger agua (*foto de abajo*). A la jovencita que está llenando su botellín en el río Kunene le cuelgan por delante de la frente las dos trenzas tradicionalmente distintivas de las prepúberes.**







dad hasta 1994, más de 20 años después de construido aquel dique. Entre tanto, una presa en el Salto de Epupa acabaría con el modo de vida de los himba. "Ese muro arrojará a los himba a los márgenes de la sociedad, donde a ellos les es imposible sobrevivir", pronostica Phil Ya Nangoloh, director ejecutivo de la Sociedad Nacional para la Defensa de los Derechos Humanos de Namibia.

En cierto modo, la presa les dejará a los himba sin río y llevará sus beneficios a gentes de fuera de Kaokolandia. Según el informe del Comité Mundial de Presas "los embalses toman unos recursos... que producen alimentos y formas de vida para la población local y los transforman en otra serie de recursos... que proporcionan beneficios a gentes que viven en otras partes. En un sentido, pues, las grandes presas exportan ríos y tierras".

## ¿Hacia un combate?

Una mañana que Tjiuma viene a nuestro campamento a tomar café con nosotros, le pregunto qué cree que sucederá realmente si el gobierno sigue adelante con sus planes sobre la proyectada presa. Sé que él tiene experiencia militar por haberle reclutado Sudáfrica como guía durante la guerra de la independencia. Mientras oteamos el río Kunene en la temprana tranquilidad mañanera, admite que los himba tienen un plan para resistir. Más de 50 de los jefes himba estuvieron en el ejército durante la guerra —dice— y todavía tienen en sus chozas viejos rifles 303.

Una semana más tarde, visitando yo en Windhoek al ministro de minas y energía, le pregunto como quien no quiere la cosa qué es lo que haría el gobierno si los himba se resistiesen con violencia. Su respuesta es estremecedora: "Les conocemos bien; no pueden hacer nada. Si intentan algo, los aniquilaremos, naturalmente. Pero no creo que las cosas lleguen a eso."

## Bibliografía complementaria


HIMBA: NOMADS OF NAMIBIA. Margaret Jacobsohn, Peter Pickford & Beverly Pickford. Struik Publishers, Ciudad del Cabo, 1990. Publicado en los EE.UU. por Appleton Communications, 1992.




# La historia de la ciencia durante los últimos 25 años

José María López Piñero

Los profesionales de los estudios sociales sobre la ciencia están llegando a un consenso casi general acerca de un proceso fundamental desarrollado en los últimos veinticinco años. Aunque se formule de diversos modos, parece haber acuerdo de que la crisis profunda y al parecer irreversible de la investigación subvencionada y dependiente de los poderes públicos es lo que caracteriza la trayectoria del último cuarto del siglo XX. Los diletantes y ensayistas suelen manejar una imagen distorsionada de este tipo de organización de la actividad científica, haciéndola depender de ideologías y coyunturas políticas e ignorando que ha constituido hasta ahora una de las estructuras básicas de la actividad científica del período contemporáneo.

En este lugar es innecesario recordar que su escenario original fue la Francia de la primera mitad del siglo XIX y que se consolidó durante la segunda mitad de la centuria en Centroeuropa con un modelo de institucionalización que después se adoptó —o se intentó adoptar— en el resto del mundo. En la jerga de nuestra disciplina ha sido habitual utilizar la expresión "big science" para referirse a su etapa culminante en las décadas centrales del siglo XX, mientras que su crisis actual suele cifrarse en la consideración de la investigación académica con fondos públicos como "hobby research".

## El autor

JOSE MARIA LOPEZ PIÑERO. Cuando la revista inició la sección "Hace" en noviembre de 1978, presentábamos a su autor durante trece años con las palabras siguientes: "La sección está a cargo del profesor J. M. López Piñero, catedrático de Historia de la Medicina en la Universidad de Valencia, director del Instituto de Historia de la Ciencia de dicho centro superior, autor de múltiples libros sobre el tema y discípulo de Pedro Laín Entralgo y Erwin H. Ackerknecht, título este último por el que prefiere distinguirse." Desde entonces ha continuado investigando sin cesar, su libro sobre Cajal acaba de salir de imprenta, y abriendo nuevos caminos a la historiografía, en particular al estudio de la materia médica renacentista.

La publicidad consumista que manipula hoy todos los medios de comunicación mantiene la creencia de un progreso continuo y desenfrenado, con noticias diarias de descubrimientos trascendentales. Su tópico favorito es que se va a iniciar un milenio de "nuevas tecnologías", cuya directa relación con el lenguaje de las cotizaciones bursátiles conoce cualquiera. En este contexto resulta impertinente ocuparse del desmantelamiento de las instituciones académicas dedicadas a investigaciones "no rentables" y, todavía menos, de retrocesos. La acelerada desaparición de centros públicos en los países más ricos se ha conseguido que pase inadvertida. Sin embargo, no han podido ocultarse por completo algunos graves retrocesos, que pueden ejemplificarse en el de la salud. La publicidad, con todo su poder, es incapaz de desmentir que durante el último cuarto del siglo XX se ha producido un terrible paso atrás en el terreno sanitario. El triunfalismo que teníamos los médicos al declararse en 1979 la erradicación mundial de la viruela parece un sueño de ilusos en la situación actual, cuando la tercera parte de la humanidad padece tuberculosis —que crece con rapidez incluso en los países más desarrollados— y la mitad, paludismo, que se ha reintroducido en zonas en las que estaba erradicado, como los Estados Unidos, lo mismo que lo han hecho la poliomielitis, la difteria y otras afecciones que parecían superadas en países europeos que hace unas décadas tenían sistemas de salud modélicos.

El proceso de desmantelamiento de las instituciones científicas públicas condiciona, por supuesto, cualquier balance honesto que se intente de la trayectoria durante los últimos veinticinco años de la investigación histórica de la ciencia, que puede aducirse como prototipo de "hobby research".

### Historia de la medicina e historia de la ciencia

El estudio histórico de la medicina y el de la ciencia han tenido trayectorias claramente diferenciadas y modelos muy distintos de institucionalización.

Hasta mediados del siglo XIX no existió distinción entre la información médica de la propia época y la

*El proceso de desmantelamiento de las instituciones científicas públicas condiciona cualquier balance que se intente de la trayectoria, durante los últimos veinticinco años, de la investigación histórica de la ciencia*

procedente del pasado. La historia de la medicina, consistente en la recopilación de la información médica sin límites temporales, principalmente mediante repertorios biobibliográficos, alcanzó un amplio desarrollo durante la Ilustración, convirtiéndose en una materia de presencia obligada en la investigación y la enseñanza. La situación cambió radicalmente con la aparición de la obsolescencia informativa, es decir, de la acelerada tendencia a la caída en desuso de las publicaciones y demás documentos médicos.

A partir de la segunda mitad del Ochocientos, se constituyó la documentación médica como disciplina independiente al servicio de la información vigente o en uso, mientras la obsoleta o en desuso pareció al principio condenada a refugiarse en la llamada "alta cultura científica". A grandes rasgos, éste fue el destino de la producción del grupo de fundadores de la historiografía médica en sentido estricto —integrado principalmente por los alemanes A. Henschel, L. Choulant y H. Haeser, el francés C. Daremberg, los italianos S. de Renzi y F. Puccinoti, y los holandeses Z. F. Ermerins y U. C. Bussemaker, cuyo principal órgano de expresión fue la revista *Janus* (1846-1853)—, que propugnaron e hicieron realidad el estudio histórico de la medicina mediante "un cuidadoso análisis de las fuentes" con técnicas específicas de investigación.

Sin embargo, un movimiento encabezado a finales del siglo XIX por el vienés Theodor Puschmann reintegró la disciplina a la enseñanza y la investigación médicas, convirtiéndola en una rigurosa perspectiva integradora de la enfermedad y el conjunto de prácticas y saberes en torno a la salud, por encima del creciente número de especialidades. Amplia y sólidamente institucionalizada, fue incorporando con gran altura las diferentes corrientes médicas, científicas e intelectuales, distanciándose por completo del positivismo vulgar desde el punto de vista epistemológico, antropológico y sociológico.

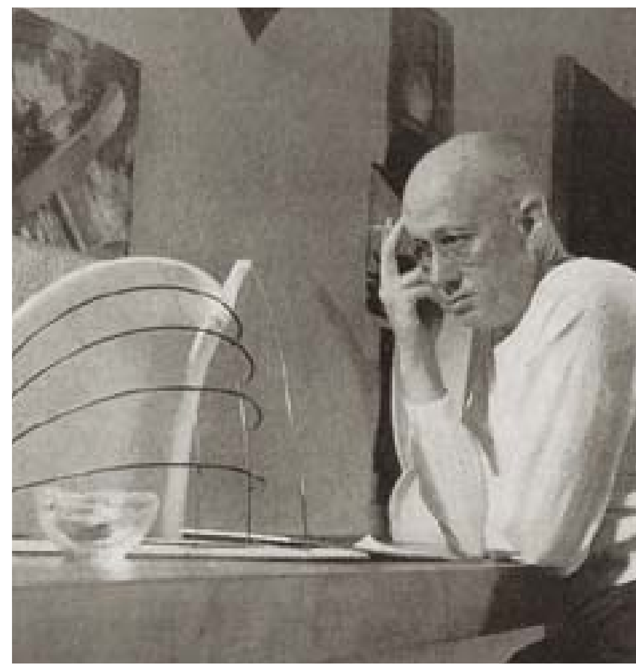
Esta trayectoria culminó a mediados del siglo XX con los lúcidos planteamientos renovadores de H. E. Sigerist y P. Diepgen, brillantemente puestos en práctica por sus discípulos y seguidores de la generación siguiente, entre ellos, E. H. Ackerknecht, G. Rosen,





**1. LA CIENCIA ESPAÑOLA tiene en Santiago Ramón y Cajal (*izquierda*) e Ignacio Bolívar (*derecha*) dos de sus figuras señeras. A la extraordinaria calidad de sus investigaciones siguieron unas dotes singulares de magisterio.**





**2. LA TECNICA ESPAÑOLA se siente representada en el ingenio creador de Leopoldo Torres Quevedo (*izquierda*) y la sólida audacia de Eduardo Torroja (*derecha*).**

O. Temkin, P. Laín Entralgo, E. Lesky y L. Belloni. Uno de los aspectos destacados por Sigerist fue que la historia de la medicina no es en absoluto una vertiente de la historia de la ciencia, aunque tenga amplias intersecciones con ella, ya que los saberes médicos son solamente uno de los aspectos relacionados con las complejas cuestiones en torno a la salud y la enfermedad.

En los años setenta, la disciplina contaba con centenares de institutos y millares de profesionales especializados que desarrollaban ambiciosos programas de investigación e impartían una o varias asignaturas obligatorias en la práctica totalidad de Europa, los Estados Unidos y otros países de América y Asia. Conviene anotar que los únicos europeos que quedaron al margen de toda esta trayectoria fueron Gran Bretaña y España, a pesar de la presencia en nuestro mundo académico de Laín Entralgo, figura del máximo rango internacional.

El punto de partida de la historiografía de la ciencia en sentido estricto fue paralelo al de la medicina, aunque no se produjo hasta los años de transición del siglo XIX al XX, sobre todo a través de la relación que entonces mantuvieron varios estudiosos de la historia de las matemáticas y de las ciencias físicas, entre los que destacan el francés P. Tannery, el alemán M. Cantor, el sueco G. H. Eneström y el danés H. G. Zeuthen. Poco después se incorporaron los de otras áreas científicas, entre ellos, los dedicados a la historia de la biología, encabezados por el checo E. Rádl y el noruego N. E. Nordenskiöld.

La noción de "historia general de la ciencia" fue principalmente formulada por Tannery como una síntesis consistente en el estudio del desarrollo conjunto de todas las ramas del saber de acuerdo con los planteamientos positivistas de Comte. Su primera institución académica fue la cátedra de historia de la ciencia del Collège de France, cuya creación había sido solicitada en 1832 por el propio Comte, pero que no se dotó hasta 1892 para Pierre Lafitte, el más ortodoxo de sus discípulos. Tras la muerte de Lafitte en 1903, se produjo un gran escándalo cuando para sucederle se rechazó la candidatura de Tannery, nombrándose como titular a un cristalógrafo de escasa preparación histórico-científica y de mentalidad positivista vulgar. La cátedra fue desdotada en 1922, aunque tres años antes se había creado la de la Sorbonne, que ocupó A. Rey, quien en 1932 fundó el primer instituto de la disciplina en dicha universidad.

La diferente trayectoria de la historiografía de la ciencia no sólo se debe a la prolongada vigencia del positivismo, sino a la institucionalización limitada a la "alta cultura". Nunca ha llegado a convertirse en una asignatura sólidamente integrada en los planes de estudios de las facultades de ciencias, a pesar de haberse demostrado tempranamente que resulta indispensable en la formación de los científicos, para superar el dogmatismo y abordar seriamente las cuestiones conceptuales, metodológicas y sociales.

Estas diferencias pueden ejemplificarse en la polémica que en 1935 mantuvieron Sigerist, que dirigía el Instituto de Historia de la Medicina, de Baltimore, tras verse obligado a abandonar el de Leipzig por la subida al poder de los nazis, y Sarton, belga emigrado a los Estados Unidos en 1914, donde se convirtió en la máxima autoridad de la historiografía de la ciencia, aunque solamente daba un curso semestral, sin relación oficial ni sueldo, en la Universidad de Harvard, de la que no fue nombrado profesor hasta 1950.

Entre el rudo enfoque positivista que sirvió de fundamento a la ejemplar labor de Sarton y la posición de vanguardia desde el punto de vista epistemológico, antropológico y sociológico de la renovación encabezada por Sigerist existía un abismo, que es necesario tener en cuenta para situar adecuadamente la situación actual y la del último cuarto de siglo.

París fue el principal escenario de la superación del positivismo y también del eurocentrismo por parte de la historiografía de la ciencia, especialmente tras la organización de la Sociedad Internacional de la disciplina (1928). A. Rey tuvo muy directa relación con el Centre International de Synthèse, fundado por H. Berr, quien propugnó la "histoire intégrale" luego desarrollada por M. Boch y L. Febvre. A este ambiente perteneció también, entre otros, H. Metzger, introductora de las aportaciones de la antropología social en la historiografía de la química. Desde el punto de vista teórico, su culminación puede personificarse en la obra de G. Bachelard, que en 1940 pasó a dirigir el Instituto de Historia de la Ciencia, de la Sorbonne, y en la producción histórico-científica de A. Koyré.



**AREA DE ENSAYOS AERODINAMICOS del Instituto Nacional de Técnicas Aeronáuticas. Deflector Isla Hierro.**

En Centroeuropa, la historiografía de la ciencia se desarrolló sobre todo asociada a la de la medicina, integrándose, por ejemplo, en la Sociedad Alemana de Historia de la Medicina, que había sido creada en 1901. Sin embargo, se redujo también al ámbito de la "alta cultura". F. Dannemann, autor del primer gran tratado de historia general de la ciencia, dio clases en la Universidad de Bonn desde principios de siglo, pero no fue nombrado "Honorarprofessor" hasta 1926. El primer instituto fue fundado en 1924 en Heidelberg, con el apoyo de una fundación privada, para J. Ruska, importante investigador de la alquimia medieval, que tuvo una difícil relación con la Universidad local, por lo que acabó trasladándose a Berlín como director de un nuevo instituto, que en 1929 se fusionó con el de historia de la medicina encabezado por P. Diepgen.

La mayoría de los demás países siguió el modelo parisino o el centroeuropeo, con excepciones como Gran Bretaña y España. El mundo académico británico se redujo prácticamente a la dotación en 1923 de un pequeño departamento en el University College, de Londres, que dirigió el médico C. Singer, modesto seguidor de una orientación positivista similar a la de Sarton. El español ignoró por completo la disciplina.



**INSTALACION de medidas magnéticas robotizada, diseñada y construida en el Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón.**

## La paralización de la trayectoria de la historiografía de la ciencia

El acusado descenso del número de instituciones públicas dedicadas a la investigación y la enseñanza de la historia de la ciencia durante el último cuarto del siglo XX es un hecho evidente en casi todos los países de Europa y América. A primera vista, lo que más destaca es que hayan desaparecido o vegeten de manera lamentable los centros más importantes y de mayor tradición, como los institutos europeos de Viena, Leipzig, Berlín, Roma o París y los americanos de las Universidades de Harvard, California, Johns Hopkins o Yale.

En España, tienen un significado inequívoco la desdotación de la cátedra que ocupaba Laín Entralgo y la conversión del instituto que fundó



**CONSTRUCCION del nuevo jardín botánico de Barcelona con ayuda europea. Epítome de los ecosistemas mediterráneos, acogerá la nueva sede del Instituto Botánico.**

en una sección del Centro de Estudios Históricos. Por primera vez desde los inicios de la medicina contemporánea, la historia de la medicina está dejando de figurar en los planes de estudio de los profesionales de la salud, en parte desplazada por una versión degradada de la bioética, que tiene para el neoliberalismo económico una función de catecismo ideológico semejante a la que desempeñó la "formación del espíritu nacional" para el fascismo y la "introducción al materialismo histórico" para el estalinismo. Privados de centros propios, los profesionales de la historiografía de la ciencia tienen que trabajar dispersos en instituciones de disciplinas muy heterogéneas o ponerse al servicio de los espectáculos culturales dependientes del mecenazgo de empresas privadas y de los poderes políticos.

En estas circunstancias resultan imposibles los programas de trabajo a largo plazo. Sin instituciones sólidas, ni siquiera se plantean tareas continuadas durante más de tres décadas, como la que, bajo la dirección de K. Sudhoff, permitió un conocimiento de la medicina medieval europea y del paracelsismo que pulverizó los enfoques del positivismo vulgar.

Ello ha conducido inevitablemente a la frustración del vigoroso proceso de innovación de los métodos y las técnicas que la historiografía de la ciencia estaba experimentando desde las décadas centrales del siglo. Tras asumir con rigurosidad numerosas tendencias epistemológicas, historiológicas y sociológicas, la disciplina se había planteado la necesidad de una reformulación en profundidad de sus métodos que, a su vez, exigía procedimientos inéditos de investigación.

La frustración de esta línea ha permitido el paso a primer plano de las modas falsamente renovadoras. En los años setenta, todavía fue una mera anécdota para los profesionales serios la propuesta de Lakatos de que un sistemilla filosófico, derivado del fixismo epistemológico y el etnocentrismo de Popper, se convirtiera en norma y guía del estudio comparado, transhistórico y transcultural de las distintas formas de actividad científica, que es la tarea central de la historiografía de la ciencia. Mayor confusión habían producido las pretensiones de Foucault, en su mayor parte refritos y plagios ensayísticos de los acercamientos histórico-sociales de los discípulos y seguidores de Sigerist, aunque conviene recordar su condición de mandarín cultural y político.

Las modas que seducen a los que desean "estar al día" sin esfuerzo alguno comenzaron a pasar a primer plano con las recetas estructuralistas y, sobre todo, con el lanzamiento, tras un hábil mercadeo, del conocido librito de Kuhn como una "revolución epistemológica". Aunque desautorizada por voces de tanto relieve como las de M. W. Wartofski y P. Rossi, fue tomada principalmente en serio por los historiadores de las ciencias físico-matemáticas, desde su posición en el área de la "alta cultura". Los historiadores de la medicina difícilmente mordieron el anzuelo, entre otras razones, porque Kuhn afirmaba haber "descubierto" un libro del inmunólogo L. Fleck, que fatuamente consideró como "antecedente" de su pensamiento. En realidad, este libro y otros trabajos de Fleck eran conocidos por cualquier estudiante de la asignatura obligatoria "In-

troducción a la medicina", que impartían los profesores de historia de la medicina, porque en cualquiera de sus manuales se citaba como uno de los numerosos médicos centroeuropeos influidos en cuestiones teóricas por la renovación de Sigerist. Para saberlo, a Kuhn le hubiera bastado con leer un poco o, simplemente, hablar con O. Temkin, importante discípulo de Sigerist que entonces dirigía el Instituto de Historia de la Medicina, de Baltimore.

Resulta muy penoso que el retroceso de la institucionalización de la disciplina haya conducido después a numerosas publicaciones acerca de Fleck que han mantenido el despropósito de que "la medicina representa epistemológicamente, en oposición a la física y la astronomía, un territorio sin descubrir". En una de ellas, por cierto alemana, se ha llegado a decir que el gran Puschmann era "un acaudalado profesor de cirugía". Fue el comienzo de una pendiente cada vez más degradada que, de momento, ha culminado con los "constructivistas", que han presentado, como radicales innovaciones, planteamientos y nociones conocidos desde hace más de medio siglo por cualquier familiarizado con los estudios históricos sobre la medicina que no se limite a seguir como oráculos las publicaciones "solamente en inglés". Peores todavía son, sin embargo, quienes los han denunciado como "impostores intelectuales" desde ideologías sacralizadoras de la "objetividad" y la "neutralidad" de la ciencia, algunos de los cuales han afirmado sin rebozo que la historiografía de la ciencia ha nacido hace sólo unas décadas.

Las obras de consulta ofrecen una señal clara de la paralización de la historiografía de la ciencia. Los últimos tratados son la *Histoire générales des sciences* (1957-59), dirigida por R. Taton, y la *Historia universal de la medicina* (1972-75), dirigida por P. Laín Entralgo. Por las fechas en la que fue publicado, resulta reveladora la desigualdad en calidad y extensión del *Dictionnary of Scientific Biography* (1970-1980), dirigido por C. C. Gillespie, que llega en su volumen octavo a dedicar más de cincuenta páginas a Leonardo da Vinci y poco más de una a Carolus Clusius, en la que se ignoran los indispensables estudios de F. W. T. Hunger; entre los naturalistas del Renacimiento, resulta injustificable la ausencia de autores de la talla de B. Paludanus, J. H. van Linschoten o J. Camerarius; tampoco aparece G. B. Ramusio, mientras que su tardío seguidor R. Hakluyt tiene un largo capítulo pleno de patrioterismo, en el que ni siquiera falta la aclamación de la colección de viajes que editó como "epopeya en prosa de la moderna nación inglesa".

La muerte en 1967 de R. Herrlinger frustró la gran obra de consulta que preparaba: una enciclopedia de historia de la medicina con más de cien volúmenes. Las circunstancias posteriores hicieron imposible continuarla y sólo se llegaron a editar los siete tomos del *Lexikon* de historia de los medicamentos (1968-1975), de W. Schneider. La amplitud y la precisión de sus secciones sobre botánica, química, mineralogía y zoología farmacéuticas contrastan con los groseros errores de síntesis posteriores, editadas ya de acuerdo con el consumismo incontrolado que actualmente domina las publicaciones de la disciplina. Por ejemplo, la *History of Botanical Science* (1981), de A. G. Morton, contiene equivocaciones como afirmar que la semilla del género *Capsicum* fue traída de las Indias Orientales y otras propias de la peor divulgación.

## España

A causa de la posición nuclear que la historiografía médica ha ocupado en el proceso de constitución de nuestra disciplina en España, la medicina era con notable diferencia la vertiente más estudiada de la actividad científica. Este hecho puede ejemplificarse en la publicación entre 1978 y 1986 de los cinco volúmenes de la *Historia general de la medicina española*, de L. S. Granjel, amplia síntesis de los resultados de más de un cuarto de siglo de investigación encabezada por su autor, único de la primera generación de discípulos de Laín Entralgo que consiguió tempranamente profesionalizarse. Granjel convirtió la cátedra de Salamanca en centro indiscutible de los estudios sobre la cuestión, creando los instrumentos de trabajo y desarrollando líneas conti-



**SERIE de "microcosmos" (modelos simplificados de laboratorio de ecosistemas marinos) utilizados para estudiar el efecto de la turbulencia sobre el plancton marino en el Instituto de Ciencias del Mar, de Barcelona. Son contenedores cilíndricos de metacrilato transparente que contienen agua de mar con poblaciones de plancton. Estos sistemas permiten estudiar el efecto de variables ambientales imposibles de aislar en el medio natural, ya que permiten controlar los demás factores (temperatura, luz, nutrientes, poblaciones de zooplancton, etc.). En estos microcosmos, la turbulencia se genera mediante la oscilación vertical de rejillas (*de color verde en la fotografía*). En la parte superior de los microcosmos se ven jaulas con el fondo de malla de nailon, que contienen poblaciones modificadas de copépodos. La malla permite la separación entre adultos (encerrados en la malla) y juveniles.**



**LABORATORIO del Instituto de Biología Molecular y Celular de Plantas de la Universidad Politécnica de Valencia.**

nuadas de investigación, en especial acerca de los saberes médicos desde el Renacimiento hasta la Ilustración, tareas en las que participaron sucesivamente de forma destacada R. Sancho de San Román, J. Riera y A. Carreras y colaboraron los demás profesionales del país.

Las fechas del tratado de Granjel corresponden a lo que acabamos de anotar acerca de la publicación de obras de consulta como señal clara de la paralización de la disciplina. También acerca de la actividad científica española en su conjunto la última editada ha sido la obra colectiva *Diccionario histórico de la ciencia moderna en España* (1983).

La trayectoria de las dos últimas décadas se caracteriza por el paso a primer plano del estudio de las ciencias físico-matemáticas y la técnica, que ha superado su atraso relativo anterior, situándose por delante del de la medicina desde varios puntos de vista. Hoy se tiene una imagen totalmente nueva de la actividad científica en la España de los siglos XVI y XVII, gracias a las importantes contribuciones de V. Navarro en cosmografía y física, de V. Salavert sobre el cálculo mercantil, de J. Chabás acerca de las tablas astronómicas protorrenacentistas, etc. Lo mismo sucede con la de la Ilustración y con la de los siglos XIX y XX, tras las líneas de trabajo relativas a las ciencias físico-matemáticas dirigidas principalmente por A. Lafuente, A. Roca, J. M. Sánchez Ron y A. Ten. Más radical todavía es el cambio que han significado para el conocimiento de la ingeniería y la ciencia aplicada renacentista los estudios de M. Esteban Piñeiro, N. García Tapia y M. I. Maroto, varios de los cuales contienen hallazgos espectaculares.

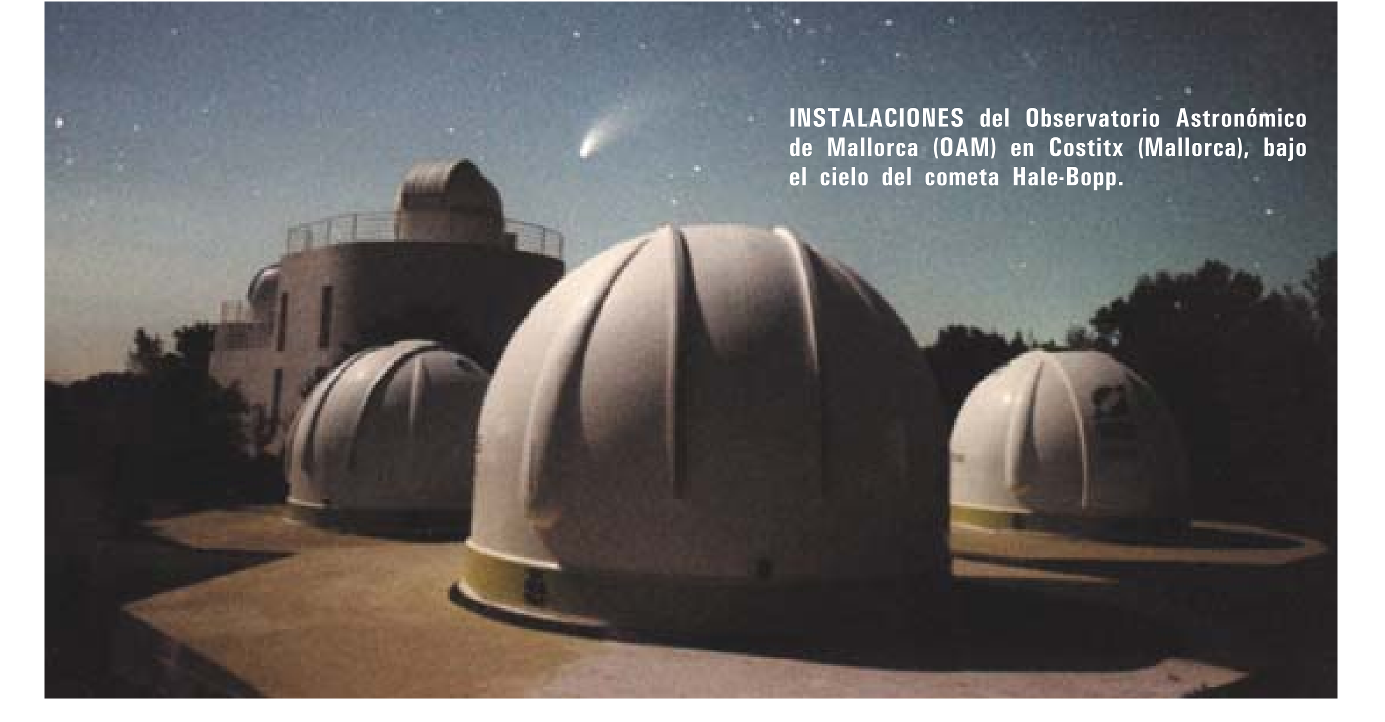
También se ha superado el descuido anterior de las ciencias biológicas, terreno al que F. J. Puerto, dentro de su dedicación a la historia de la farmacia, ha aportado estudios indispensables sobre la botánica de la Ilustración. Por primera vez hay en nuestro país historiadores de la ciencia procedentes de la licenciatura de biología, que se han ocupado con rigor de la botánica, como J. M. Camarasa, M. A. Puig Samper y J. M. Valderas, o han abordado de modo sistemático la paleontología (F. Pelayo) y la ecología (S. Casado). Algunos historiadores de la medicina también hemos participado en este esfuerzo.

Aunque la historia de la medicina no ocupe ya una posición hegemónica casi en solitario, ha motivado investigaciones importantes, entre las que sobresalen las dedicadas a la Baja Edad Media por el malogrado L. García Ballester, quien hace poco había llegado a los veinticinco años como responsable de la modélica edición crítica de las obras médicas completas de Arnau de Vilanova.

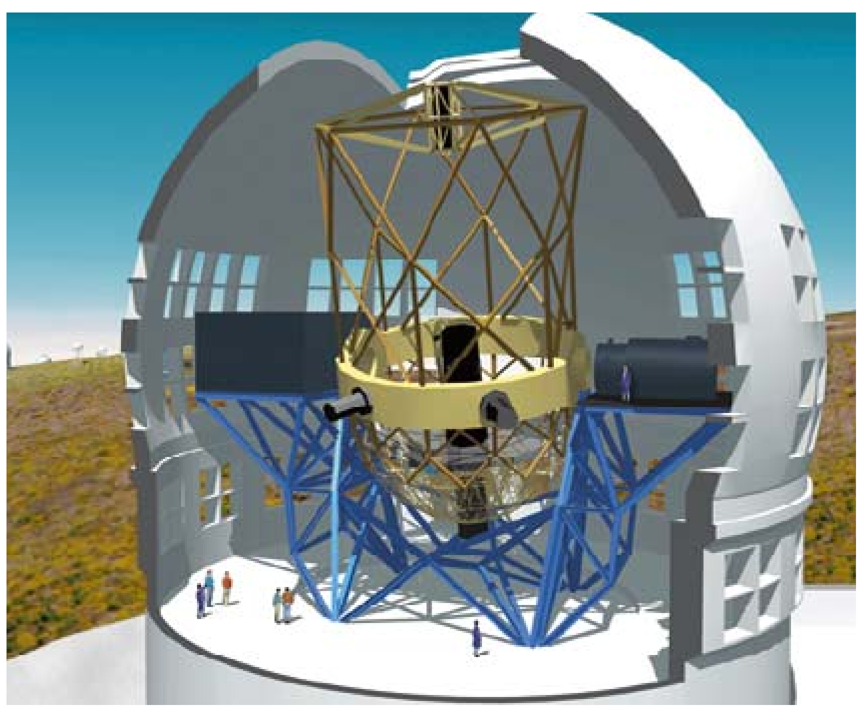
Otras tendencias destacables de las dos últimas dé-



**LABORATORIO de Biología Molecular de Insectos. Instituto de Biología Molecular de Barcelona.**



**INSTALACIONES del Observatorio Astronómico de Mallorca (OAM) en Costitx (Mallorca), bajo el cielo del cometa Hale-Bopp.**



**VISTA del Gran Telescopio CANARIAS en su ubicación en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma. Este telescopio, con más de 10 metros de diámetro en su espejo principal, permitirá realizar estudios punteros sobre el universo, relanzando la investigación astrofísica en España.**

cadas son la creciente calidad de los trabajos sobre instituciones y la publicación de repertorios de fuentes impresas de la actividad científica española. La primera se debe en gran parte a la aparición de profesionales de nuestra disciplina procedentes de facultades de historia, que ha puesto de relieve la carencia del sentido del debate entre "internalismo" y "externalismo". La segunda ha constituido una de las metas centrales del grupo de Valencia, que hasta el momento ha publicado quince volúmenes bibliográficos sobre libros y revistas españoles de medicina, ciencias físico-matemáticas y química, desde los incunables hasta 1950.

El denominador común de todos los trabajos citados es la ausencia de respaldo económico, al que se une en muchas ocasiones la indiferencia e incluso el obstáculo institucional. Ello significa el retroceso a una dependencia casi completa del voluntarismo, ya que las expectativas de superarlo han quedado por completo defraudadas.

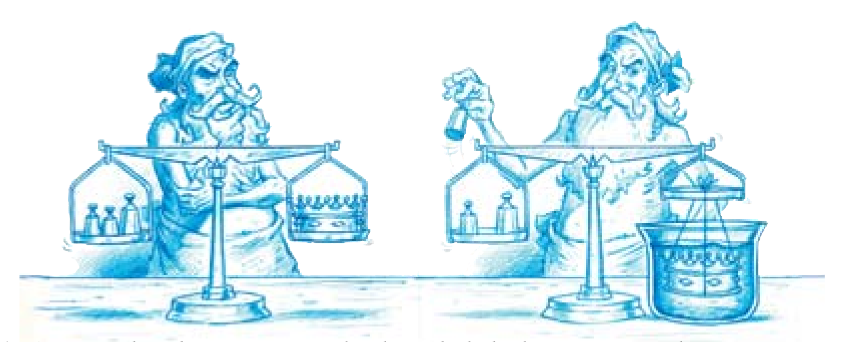
Otra consecuencia es que la mayoría de los trabajos de investigación del sector aparece en series monográficas, que F. J. Puerto ha calificado con humor negro de "clandestinas", o en remotas revistas especializadas de real o supuesto carácter internacional, lo que dificulta su difusión en los ambientes académicos y en el horizonte cultural medio de nuestro país. Esta posición marginal no solamente explica la ausencia de información, sino también la pervivencia de viejos tópicos gravemente erróneos, incluso en publicaciones prestigiosas. Sobre otras materias resultarían impensables, por ejemplo, equivocaciones tan garrafales como considerar como "heroicos adelantados" de la disección de cadáveres humanos a artistas que se limitaron a ser discípulos de la enseñanza anatómica con elevado número de autopsias reglamentarias; interpretar la actividad en torno a la historia natural a partir del coleccionismo, los "gabinetes de maravillas" y el mecenazgo; presentar a Cajal como autodidacta e investigador sin raíces históricas en la actividad científica española; afirmar que la farmacoterapia anterior al siglo XX era ineficaz, etc.

Roland Lehoucq y Jean-Michel Courty

# El empuje de Arquímedes

Sospechó un día Hierón, rey de Siracusa (265-215 a.C.), que su orífice le había robado. ¿Había el artesano sustituido con plata parte del oro destinado a la corona del monarca? Pidió Hierón a su amigo Arquímedes que comprobase qué proporción de oro contenía el distintivo regio. Intentó el gran geómetra calcular el volumen de la corona y su densidad. Pero la complicada forma de la corona vedaba cualquier cálculo sencillo. Pretende la leyenda que Arquímedes tomó un baño para reflexionar y que observó que la bañera se desbordaba cuando entraba en ella. Comprendió entonces que la inmersión de un cuerpo desplaza una cantidad de agua equivalente a su volumen. Se lanzó entonces desnudo a la calle gritando *¡Eureka!*

Arquímedes formuló así lo que había observado: todo cuerpo sumergido en un líquido sufre un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen desplazado. ¡Hierón sería complacido! Para determinar la densidad de la corona respecto a la del agua, le bastaba con medir la disminución de su peso aparente en el agua. Imaginemos las medidas efectuadas por Arquímedes para satisfacer al rey. Sin duda, empezó por pesar la corona suspendiéndola en el plato de una balanza. Después repitió la operación con la corona sumergida en agua. Para restablecer el equilibrio, debió retirar pesas del plato opuesto al que sostenía la corona. Luego calculó la densidad del metal mediante el cociente del peso de la corona y el peso retirado del plato. Repitió la operación con un lingote de oro, a fin de comparar la densidad de la corona con la del oro puro.



*1. Arquímedes desea conocer la densidad de la corona real. Empieza por pesarla* (izquierda). *La sumerge luego en agua* (derecha). *Esta ejerce una fuerza hacia arriba que desequilibra la balanza. Para nivelarla, hay que quitar un peso igual al del volumen del agua desplazada, o sea, el volumen* v *de la corona, multiplicado por la densidad del agua, que vale un gramo por centímetro cúbico (es decir,* $\rho_{agua}$v*). Ahora bien, el peso de la corona es igual a su volumen* v*, multiplicado por la densidad de la aleación de la que está hecha (es decir,* $\rho_{aleación}$v*). El cociente de ambas cantidades nos da la relación entre las dos densidades, o sea, la densidad de la aleación.*

## Arquímedes y la presión

¿Por qué el empuje de Arquímedes está siempre dirigido hacia arriba y es igual al peso del volumen del líquido desalojado? Cuando la presión que reina en un fluido es uniforme, la resultante de las fuerzas que se ejercen sobre la superficie de un volumen de forma cualquiera es nula. En cambio, en el seno de un fluido situado en la superficie terrestre, la presión no es uniforme, sino que crece con la profundidad a causa de la gravedad. En los océanos, por ejemplo, la presión aumenta el equivalente a una vez la presión atmosférica cada diez metros (unos $10^5$ pascal). La fuerza de Arquímedes es vertical, pues resulta de la diferencia entre las presiones que reinan en altitudes distintas dentro del fluido.

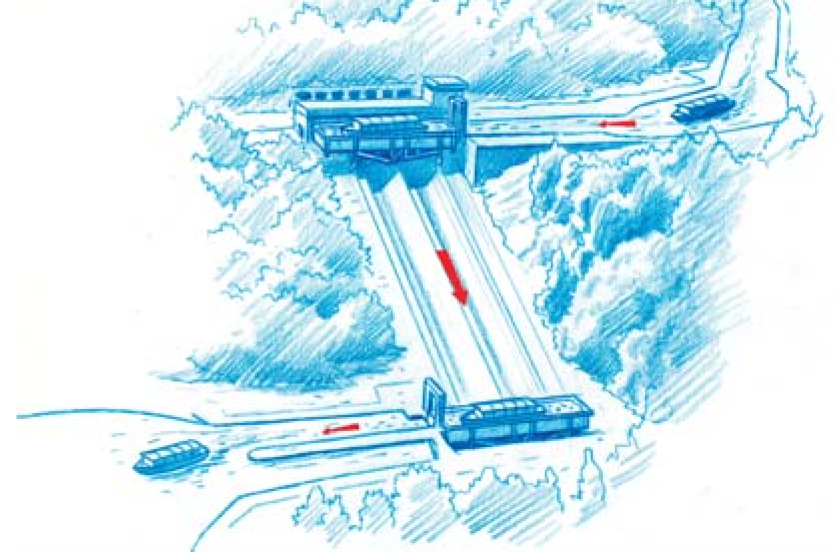
Examinemos el caso de un tubo cilíndrico sumergido en posición vertical. Ese tubo es simétrico y, por ello, las fuerzas de presión que actúan sobre la parte vertical de su superficie se compensan exactamente, ya que en cada plano horizontal es nula la resultante de las fuerzas ejercidas sobre el cuerpo. En cambio, la presión que sufre el tubo en su cara inferior es mayor que la que se ejerce en su cara superior. Dirigida hacia arriba, la resultante de las fuerzas de presión, el empuje de Arquímedes, es la misma que la que el fluido ejercería sobre una "columna de agua" que ocupase el mismo volumen. Esa columna de agua está en equilibrio, puesto que se halla sumergida en... agua. Su peso contrarresta exactamente el empuje de Arquímedes, que es igual al peso de la columna de agua, es decir, al "peso del volumen del líquido desalojado". Este razonamiento se generaliza a objetos de formas cualesquiera.

Válido para el seno de líquidos, el principio de Arquímedes es aplicable a cualquier gas sometido a la atracción gravitatoria terrestre. Lo mismo que en el agua, la presión atmosférica disminuye en el aire con la altitud, sólo que mucho más lentamente. Un objeto situado en el aire sufre también un empuje de Arquímedes, ya que desplaza un volumen de aire. Ese empuje es del orden de 1000 veces menor que en el agua, porque el aire es 1000 veces menos denso que el agua. Por ello, aparte del estudio de aerostatos y globos de aire caliente, suele

despreciarse la fuerza de Arquímedes ejercida por el aire.

Un objeto cuyo peso compensa al empuje de Arquímedes parece ingrávido. En el mar, flota entre dos aguas. Ese tipo de equilibrio se emplea, por ejemplo, para entrenar a los astronautas a maniobrar en el espacio. Se les sumerge con su escafandra en una piscina, de manera que la fuerza de Arquímedes los mantenga en suspensión.

La posibilidad de modificar el peso aparente en el agua es esencial para los submarinos. Para emerger o sumergirse, los oficiales controlan la intensidad del peso aparente del navío vaciando o llenando los tanques de inmersión (lastres), que se hallan entre los cascos interior y exterior del buque. El submarino francés *Le Triomphant* (138 metros de eslora) desplaza 14.300 toneladas de agua en inmersión. Para emerger, hay que evacuar más de 1700 toneladas de agua contenida en los lastres y sustituirlas por aire. Cuando la masa de *Le Triomphant* disminuye en esa cantidad, sufre un empuje de Arquímedes superior a su peso y, entonces, se convierte en un... barco.



*2. El "plano inclinado" es un ascensor de barcos situado en Saint-Louis-Arzeviller (Lorena). Unico en su género en Europa, sustituye a 17 esclusas. Dispone de un estanque concebido para 900 toneladas de agua. Este sube y baja por el plano inclinado mediante un sistema de motores y contrapesos. Cuando una embarcación penetra en tamaño estanque móvil, desplaza una masa de agua equivalente a la masa del volumen sumergido, por lo que la masa del estanque permanece constante. De ese modo una gabarra sube o baja 44 metros en cuatro minutos.*

## Un ascensor para barcos

Pese a que los barcos modernos posean una estructura de metal, mucho más denso que el agua, su densidad media es reducida, pues albergan mucho aire en sus calas. La línea de flotación de esos barcos de acero varía en función del cargamento. Ello plantea problemas a los cargueros, a menudo inestables en vacío. Muy realzados sobre el agua, ofrecen un gran frente a vientos y olas y, en ciertos buques, la hélice incluso sobresale del agua. Los marinos restablecen la estabilidad de la embarcación lastrando las calas con agua. Esa operación, el "lastrado", es necesaria casi en cada viaje. Resulta así que un carguero lleno debe transportar un 40 por ciento de su carga no comercial en forma de agua de lastre, proporción que aumenta si el mal tiempo exige mayor estabilidad. El lastrado adolece de numerosos inconvenientes: durante el vaciado de las calas, los desechos y los restos de productos químicos que las mismas contienen, hidrocarburos incluidos, son lanzados al mar incontroladamente.

La línea de flotación de un buque depende, asimismo, de la densidad y la temperatura del mar. Aunque los mares Negro y Mediterráneo estén conectados, sus salinidades difieren. Mientras que un litro de agua del Mediterráneo contiene 38 gramos de sal, el mismo volumen de agua del mar Negro contiene sólo 18 gramos. A temperaturas iguales (20 °C, por ejemplo), esa diferencia de salinidades hace que el empuje de Arquímedes varíe en un 1,5 por ciento. Cuando un navío abandona el Mediterráneo y penetra en el mar Negro, se hunde hasta que su volumen sumergido haya aumentado todavía un 1,5 por ciento. Si, siguiendo su rumbo, una embarcación remonta el Danubio, su volumen sumergido aumentará en un 1,5 por ciento. En función del cargamento y del calado, tal variación podría ser problemática. Por eso las normas internacionales imponen que los niveles de flotación en agua dulce y en el mar figuren claramente en los costados de los barcos.

El empuje de Arquímedes, si bien sirve para que los barcos floten, sirve también para izarlos. Esta aplicación es una realidad en el "plano inclinado", el ascensor para barcos de Saint-Louis-Arzviller, en Lorena. En esa instalación, no sólo se izan las gabarras, sino también las esclusas que las contienen. Cuando el "estanque" está en posición alta, se abre uno de sus extremos para que entre la embarcación. La gabarra penetra en la esclusa trasladable, y una cantidad de agua correspondiente al volumen de agua que aquélla desplaza se vierte al canal. Ahora bien, según el principio de Arquímedes, el peso de esa agua saliente equivale al peso del volumen sumergido. De ese modo, la esclusa móvil pesa 900 toneladas, contenga o no un barco. Gracias a tal regulación automática del peso de la esclusa, los motores y los contrapesos fueron normalizados de una vez por todas, es decir, para todas las embarcaciones.

Tendidas sobre el plano inclinado a 22 grados del ascensor, dos masas de 450 toneladas compensan el peso de la esclusa móvil. Como en un ascensor clásico, las masas se deslizan hacia arriba o hacia abajo a lo largo de sus cables en función del movimiento necesario. En las subidas, los motores sólo deben vencer a las fuerzas de rozamiento; en las bajadas, sirven para controlar un movimiento natural debido a un leve exceso de agua que se ha introducido en el estanque. En cuatro minutos, el plano inclinado transporta una gabarra sobre un desnivel de 44 metros.

# JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M.R. Parrondo

## ¿Cuál es la mejor estrategia en un juego de preguntas sí/no?

En un hospital de la ciudad se ha descubierto un virus letal que se propaga por vía sanguínea. El Instituto Nacional de la Salud establece un protocolo de prueba, que detecta la presencia del virus. La prudencia aconseja que toda donación de sangre se someta a la prueba.

Pero los reactivos que se utilizan son muy caros. Además, la incidencia del virus en la población es aún baja, de un exiguo 0,01 %. A los responsables de los bancos de sangre no se les escapa un viejo truco: mezclar la sangre de un grupo de donantes y pasar la mezcla por la prueba. Si sale negativa, ausencia de virus, podemos asegurar que ninguno de los integrantes de la mezcla está infectado. Si sale positiva, presencia de virus, se procede a un análisis individualizado de cuantos componen el grupo de la mezcla. Pero, ¿cuándo podemos decir que el número de integrantes del grupo de donantes aunado para la mezcla es el óptimo? Dicho de otro modo: ¿cuál es el tamaño de la mezcla exigido para realizar, en media, el menor número de pruebas? (El problema así planteado puede resolverse con algunos conocimientos elementales de probabilidad; comentaremos la solución en los próximos meses.)

Con toda lógica los responsables de los bancos piensan que el proceso de mezclas puede aplicarse de nuevo cuando la prueba de la primera mezcla es positiva. En este caso tenemos un cierto número de donantes, entre los cuales sabemos que existe al menos uno infectado. Y podemos someter a otra prueba a ciertas mezclas de estos donantes. ¿Cuál será entonces el diseño óptimo de las nuevas mezclas? El problema ahora es en apariencia bastante más complicado. Sin embargo, la solución es sorprendentemente sencilla. Guarda relación con la teoría de la información y con dos de sus aplicaciones, la codificación de mensajes y la compresión de ficheros de datos.

El problema de la mezcla de sangre es similar a los juegos en los que se tiene que adivinar algo —un personaje, un objeto de la habitación— mediante preguntas que sólo admiten una respuesta afirmativa o negativa. ¿Cuál es la mejor estrategia en este tipo de juegos? Sin advertirlo, la mayoría de la gente encuentra la óptima de un modo intuitivo, al menos en las primeras fases del juego. Si se trata de adivinar un personaje, se suele comenzar con: ¿Es hombre o mujer? ¿Español o extranjero?, Etcétera. Preguntas para las cuales la probabilidad de la respuesta afirmativa es igual a la de la respuesta negativa, es decir, 1/2.




*1. Cartones para adivinar un número del 1 al 16*

De acuerdo con la teoría de la información la pregunta óptima es aquella cuya respuesta tiene una probabilidad 1/2 de ser SÍ, y una probabilidad 1/2 de ser NO. Receta sencilla que vale para el juego de adivinación y para el problema de las mezclas de sangre.

Imaginemos, por ejemplo, que nos pidieran adivinar un número entre el 1 y el 16. Podríamos comenzar preguntando si es par o impar. De este modo descartamos 8 números y nos quedamos con 8. La siguiente pregunta tendría que descartar 4 números. En efecto, si nos han respondido que el número es par, podríamos ahora inquirir: ¿es múltiplo de cuatro? La tercera pregunta debe descartar 2 números; por último, la cuarta decidirá entre los dos que quedan. Con esta estrategia siempre acertamos el número tras cuatro preguntas, no importa cuál sea la cifra.

Podemos diseñar estrategias mejores para ciertos números. Si empezamos preguntando ¿es el 16?, la estrategia sería muy buena en el caso de que el número pensado fuera el 16, pero habríamos prácticamente desperdiciado el turno si no lo fuera; tras esa pregunta directa, sólo se ha descartado un número de los 16 posibles y la incertidumbre inicial apenas ha disminuido.

No resulta difícil demostrar que la primera estrategia —la de adivinar un número tras cuatro preguntas, con una probabilidad 1/2 de respuesta afirmativa en cada una— es, en media, la que requiere

## La teoría de la información

¿Hay alguna forma de cuantificar la *incertidumbre*, lo que desconocemos de una determinada situación? La teoría de la información de Claude Shannon nos ofrece una respuesta. Si en una situación, un experimento, un juego de adivinación, etcétera, se pueden dar diferentes instancias, 1, 2, 3,..., con probabilidades $p_1$, $p_2$, $p_3$,..., entonces la incertidumbre de esa situación es:

$$H = -p_1 \log_2 p_1 - p_2 \log_2 p_2 - p_3 \log_2 p_3 - \dots$$

La unidad que mide la incertidumbre, tal y como está definida en esta fórmula, es el bit. En el ejemplo de la adivinación de un número del 1 al 16, la incertidumbre inicial es $H = 4$ bits, ya que todos los números son igualmente probables (siempre que la persona que elige el número no tenga algún sesgo, predilección por los números pares o aversión por el 13, por ejemplo, y que nosotros *conozcamos* dicho sesgo) y su probabilidad es 1/16. Como el logaritmo en base 2 de 1/16 es –4, el resultado de la suma es 4.

Después de la primera pregunta, el lector puede comprobar que la incertidumbre es de 3 bits; después de la segunda pregunta, de 2 bits. La tercera reduce la incertidumbre hasta 1 bit y, finalmente, la última pregunta elimina toda la incertidumbre y hace que $H$ sea igual a cero.

Como cabe esperar de nuestra noción intuitiva de incertidumbre, cada pregunta la reduce. Pero la definición de Shannon es cuantitativa y nos permite calcular *cuánto* se reduce la incertidumbre. Por ejemplo, después de la pregunta ¿es 16 el número que has pensado?, si respondemos afirmativamente la incertidumbre se hace cero, mientras que con una respuesta negativa la incertidumbre es 3,9 bits. Esta pregunta apenas reduce la incertidumbre inicial si el número secreto no es 16. Para cuantificar el riesgo que estamos asumiendo con esta pregunta, lo mejor es calcular la incertidumbre *media* después de realizarla. Con una probabilidad 1/16, el número secreto es 16 y la incertidumbre se habrá hecho cero. Con una probabilidad 15/16 el número secreto no es 16 y la incertidumbre se habrá reducido a 3,9 bits. La incertidumbre media después de la pregunta es, por tanto: 0 por 1/16 más 3,9 por 15/16, es decir, 3,66 bits. De acuerdo con la teoría de Shannon resulta más eficaz preguntar si es par el número pensado que correr el riesgo preguntando si el número es 16.

Cada pregunta reduce la incertidumbre que rodea la situación, reducción que depende de la pregunta realizada. Pues bien, llamamos información media suministrada por la pregunta a los bits en que ha sido capaz de reducir la incertidumbre:

$$H_{\text{media,después}} = H_{\text{antes}} - I_{\text{pregunta}}$$

o, dicho en lenguaje más llano, la incertidumbre que tenemos después de conocer la respuesta a nuestra pregunta es la incertidumbre que teníamos antes menos la información suministrada por la pregunta. Si hay un ejemplo fascinante de cómo hacer una teoría cuantitativa a partir de nociones cualitativas y poco precisas, éste es la teoría de la información de Shannon.

Pero se puede ir aún más allá y demostrar que una pregunta cuya probabilidad de ser respondida afirmativamente sea $p$ y de ser respondida negativamente sea $1 - p$, suministra una información media:

$$I_{\text{pregunta}} = -p \log_2 p - (1 - p) \log_2 (1 - p)$$

Una fórmula que se parece mucho a la de la incertidumbre, si bien merece una interpretación distinta (y confundirla es algo que, lamentablemente, ocurre incluso en algunos textos de teoría de la información). El lector familiarizado con probabilidades y logaritmos puede demostrar este resultado. Déjenme dar sólo unas indicaciones para quienes se atrevan con la demostración: imaginen que la pregunta es: ¿pertenece el número que has pensado a un conjunto $A$? Entonces $p$ tiene que ser necesariamente la suma de las probabilidades de los elementos de $A$, y $1 - p$ la suma de las probabilidades de los elementos que no pertenecen a $A$. Por otra parte, si la respuesta es afirmativa, las nuevas probabilidades son $p_i/p$ y, si la respuesta es negativa, las nuevas probabilidades serán $p_i/(1 - p)$.

La fórmula de la información media suministrada por la pregunta tiene algo de mágico. Sólo depende de $p$, la probabilidad de que la pregunta sea contestada afirmativamente. En la figura 2 se dibuja la forma de esta curva. Toma su valor máximo, 1 bit, cuando $p = 1/2$. Las preguntas que aportan la información máxima son las que tienen la misma probabilidad de ser contestadas afirmativa y negativamente. La información ofrecida es 1 bit. Por eso, en el juego de adivinación del número, la incertidumbre inicial de 4 bits se reduce en cada pregunta en una unidad y podemos conocer el número después de la cuarta pregunta. Vemos también en la gráfica que, para $p = 1/16$, la información media suministrada es 0,34 bits, como hemos deducido un poco más arriba.

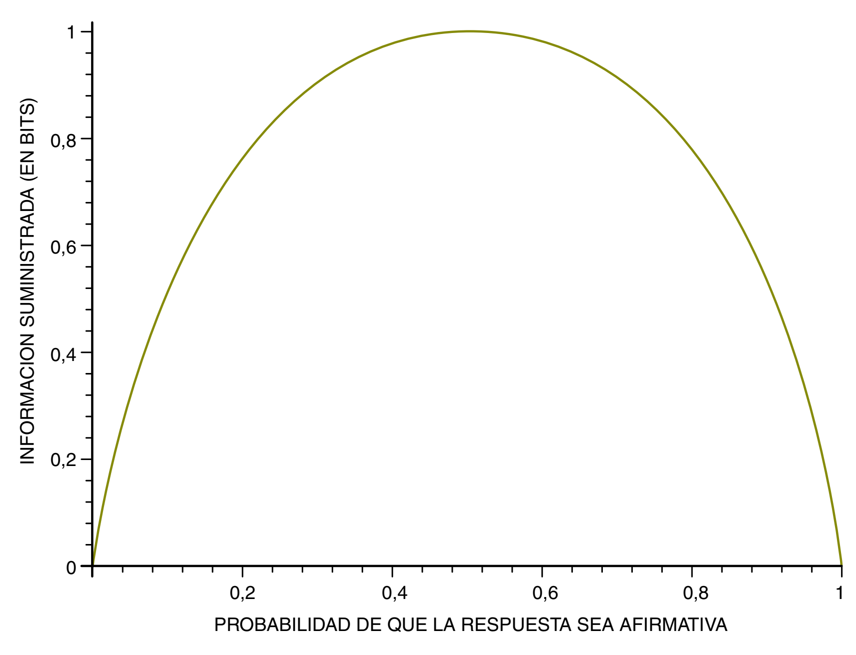
Tenemos finalmente un resultado muy interesante: si estamos ante una situación cuya incertidumbre es de $H$ bits, y si podemos realizar una serie de preguntas sí/no con probabilidad 1/2 de ser respondidas afirmativamente, es decir, preguntas que suministran 1 bit de información, entonces el número medio de preguntas necesarias para eliminar la incertidumbre será $H$. La teoría de la información nos dice, por tanto, cómo debemos hacer las preguntas y cuántas se requieren.

---

menor número de preguntas. Esta estrategia óptima se utiliza en un juego de adivinación bastante difundido. Participan dos jugadores, llamémosles Alicia y Bruno. Ella le muestra a él cuatro cartones como los de la figura y le pide que le indique en cuál de ellos se encuentra el número pensado.

Con esta información no le costará mucho a Alicia descubrir el número. Bastará con que sume 8 si Bruno le dice que está en el primer cartón, más 4 si está en el segundo, más 2 si se halla en el tercero, más 1 si está en el último cartón. Finalmente añade 1 a esta suma y obtiene el número secreto. Por ejemplo, si el número es el 11, Bruno le dirá que se encuentra en el primero y tercer cartones. Alicia sumará entonces 8+2+1 y obtendrá el número deseado.

El lector habrá adivinado enseguida que los cartones no son más que la representación binaria del número secreto menos 1. En el




*2. Información media suministrada por una pregunta en función de la probabilidad de ser respondida afirmativamente*

caso del 11, la representación binaria de 10 es precisamente 1010. En el primer cartón se encuentran los números cuya representación binaria tiene un 1 en el cuarto dígito; en el segundo cartón los que tienen un 1 en el tercer dígito, etcétera.

Detrás de este truco tan sencillo se esconde una idea interesante: la tarea de adivinar algo a través de preguntas sí/no equivale a la de *codificar* ese algo en representación binaria. Si llevamos esta equivalencia un poco más allá, nos percataremos de que encontrar la estrategia óptima en el juego de preguntas, es decir, la estrategia que minimiza en media el número de preguntas, equivale a hallar la codificación más corta.

Precisamente la búsqueda de codificaciones cortas fue una de las primeras aplicaciones de la teoría de la información de Claude Shannon. Por eso esta teoría tiene que ver con asuntos de apariencia tan dispar como los juegos de preguntas sí/no, el problema de la seguridad de las transfusiones de sangre o los algoritmos que comprimen los ficheros de su ordenador antes de enviarlos a través de Internet.

La teoría de la información nos proporciona una definición cuantitativa de la incertidumbre o el "desconocimiento" de una situación, y, por supuesto de la información que suministra la respuesta a una pregunta acerca de dicha situación. En el recuadro se ofrecen detalles técnicos de la teoría y en la figura 2 se muestra la información media suministrada por una pregunta sí/no en función de la probabilidad de que se responda afirmativamente.

Como vemos en el gráfico, la información máxima la suministran las preguntas en las que la respuesta afirmativa y negativa tienen la misma probabilidad, es decir, 1/2. Por tanto, la estrategia óptima en un juego de adivinación consistirá en atenerse a este tipo de preguntas. Nos dice la teoría que el número mínimo de preguntas sí/no necesarias para adivinar es igual a la *incertidumbre* inicial y nos proporciona una fórmula para calcular esta incertidumbre.

Vayamos con otra aplicación, la compresión de ficheros. Un fichero es un conjunto de datos binarios. Si agrupamos los datos en bloques de 20 dígitos binarios, tendremos $2^{20}$ posibles bloques. El fichero puede entonces considerarse como una lista de "palabras" extraídas de este diccionario que contiene algo más de un millón de palabras. Cada palabra es un conjunto de dígitos binarios.

Pero podemos construir otra representación binaria alternativa en la que las palabras más frecuentes estén representadas por cadenas de dígitos más cortas. De eso se ocupa un compresor de ficheros y, para ello, aplica la teoría de la información. Igual que en el caso de los cartones, una representación binaria de cada una de estas palabras puede interpretarse como las respuestas a una serie de preguntas sí/no acerca de dicha palabra. Y la estrategia óptima de preguntas es equivalente a encontrar la representación que, en media, es más corta.

A la compresión de ficheros dedicaremos el artículo del mes próximo. En números sucesivos abordaremos también la solución del problema de las transfusiones de sangre en el caso más sencillo, en el que, tras una prueba positiva de la mezcla, se hace la prueba *individualmente* a cada integrante de la misma. La respuesta difiere de la dada por la teoría de la información, es decir, el tamaño óptimo de la mezcla no hace que la probabilidad de que la prueba resulte positiva sea 1/2. ¿Por qué? Porque la teoría de la información sólo puede aplicarse a la estrategia completa de preguntas o, en este caso, de mezclas. Es decir, sólo puede aplicarse cuando, después de la prueba positiva, analizamos nuevas "submezclas". En ese caso la mejor estrategia consiste en crear mezclas cuya probabilidad de contener el virus sea 1/2. ¿Es todo lo que se puede decir al respecto? Espero que los lectores me hagan llegar sus propias respuestas y sugerencias.

No se podría concluir un artículo sobre teoría de la información sin rendir un pequeño homenaje a su creador, Claude Shannon, que murió el pasado 24 de febrero a la edad de 84 años. Quienes deseen saber más sobre su vida, y también sobre su teoría, pueden visitar el excelente sitio web que los Laboratorios Bell, en los que Shannon desarrolló la mayor parte de su actividad, han dedicado a este tema: http://www.lucent.com/minds/infotheory.

parr-km0@zenon.fis.ucm.es

# AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

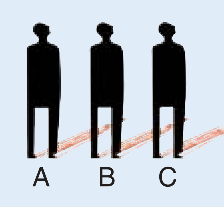
## Mentirosos alternantes

En una sala hay cinco personas. Una de ellas es absolutamente veraz, y dirá siempre la verdad en todo cuanto se le pregunte. Las otras cuatro son mentirosas alternantes, es decir, cada una de ellas va por turno diciendo la verdad, mintiendo, diciendo la verdad... Por mala suerte, no sabemos si los mentirosos alternantes van a empezar diciendo la verdad o mintiendo. Peor todavía, un mentiroso alternante puede no decidir si en la primera pregunta que se le haga va a decir la verdad o a mentir hasta después de haberla oído. Ahora bien, tras la primera pregunta, tiene que ir alternando verdades y mentiras. Por otra parte, se sabe que todos los presentes conocen quién es absolutamente veraz.

Ninguna de las personas parece de fiar. Tenemos, sin embargo, que determinar quién es absolutamente veraz. Sólo podemos hacer dos preguntas, pero no es obligado que la respuesta haya de ser un mero "sí" o "no". Hay cinco personas entre las que elegir. Cada pregunta ha estar dirigida a una sola persona (aunque es lícito hacerle las dos preguntas a una misma) y la respuesta habrá de darla solamente la persona interrogada. ¿Le parece que podremos resolverlo? (Para un posible enfoque del problema, véase el problema de "precalentamiento" para el caso de tres personas, con respuestas "sí" o "no", en la columna de la derecha.)

Para "subir nota": ¿Cuántas preguntas serían necesarias si fueran siete las personas de la sala?

**PROBLEMA DE PRECALENTAMIENTO**
¿Quién es absolutamente veraz?




TRES PERSONAS

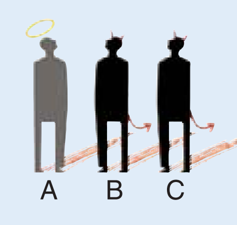
TRES PREGUNTAS **SI**/**NO**

---

1) "**A**, ¿dices tú siempre la verdad?" **SI**

2) "**A**, ¿dices tú siempre la verdad?" **SI**

***A*** es siempre veraz




---

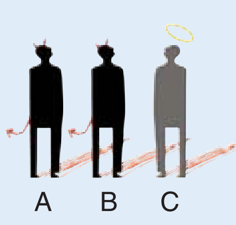
1) "**A**, ¿dices tú siempre la verdad?" **SI**

2) "**A**, ¿dices tú siempre la verdad?" **NO**

*__A__ es mentiroso alternante. Su próxima respuesta será una mentira, así que le preguntamos:*

3) "**A**, ¿dice **B** siempre la verdad?" **SI**

*__C__ es siempre veraz*



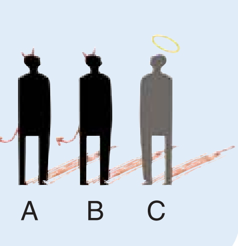

---

1) "**A**. ¿dices tú siempre la verdad?" **NO**

*__A__ es mentiroso alternante, pero esta vez está diciendo la verdad. Su próxima respuesta será una mentira, por lo que preguntamos:*

2) "**A**, ¿es **B** absolutamente veraz?" **SI**

*__C__ es siempre veraz.*




**Solución del problema del mes pasado:**

El gamberro del pescado podrido tiene que estar en la cabaña G. Puesto que recorrió cada senda exactamente una vez, no pudo haber acabado en ninguna de las cabañas accesibles por un número par de sendas: en cada visita a una de estas cabañas tuvo que recorrer una senda para entrar y otra para salir. Solamente a D y G llega un número impar de sendas. El gamberro se introdujo en la colonia desde la laguna; hubo, pues, de visitar primero la cabaña D y seguir camino hasta G.

# Ideas aplicadas

Mark Fischetti

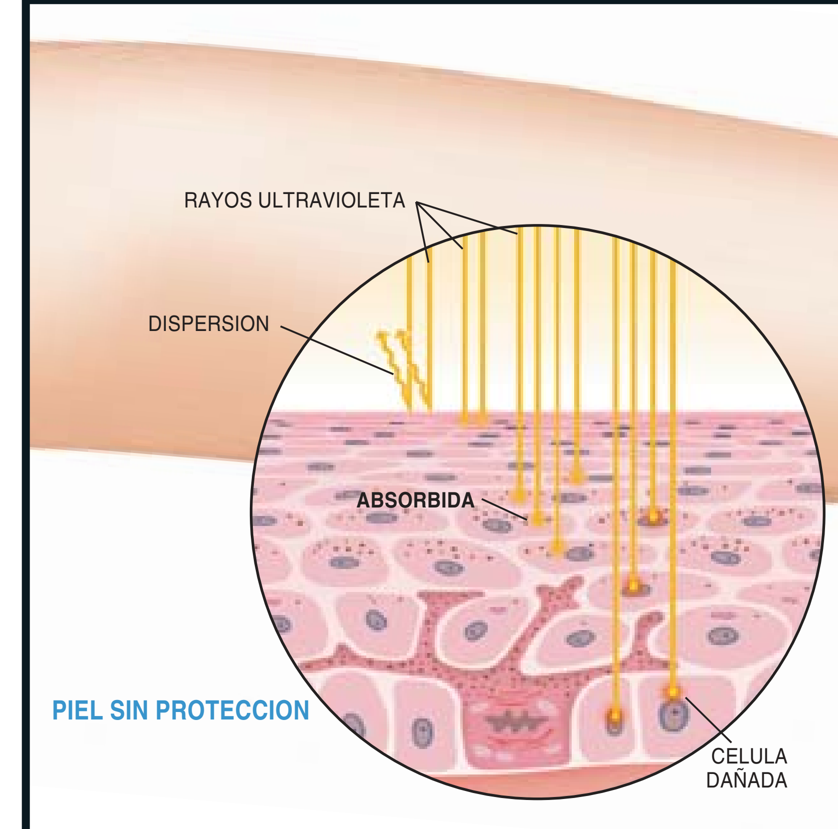
## Protectores solares

La piel, que protege nuestro cuerpo, debe defenderse a sí misma de la radiación ultravioleta solar, causa de envejecimiento prematuro y cánceres. En algo ayudan los protectores. Las quemaduras solares se deben a los intensos rayos UV que atacan a la epidermis, o capa más externa de la piel. Cuando tal ocurre, los vasos sanguíneos de las capas más profundas se dilatan y la piel se enrojece. En su esfuerzo por absorber los rayos UV, la exposición asidua promueve una producción epidérmica más intensa de melanina. Si se acumula este pigmento en cuantía suficiente, la piel se oscurece, "se broncea". Las gentes de piel morena poseen más melanina que las de piel blanca, razón por la cual tardan más en quemarse.

Las sustancias químicas que componen los protectores solares filtran los rayos UV, amortiguan los daños y retrasan así las reacciones de quemado y bronceado. Los protectores solares se designan con un factor de protección solar (FP), normalizado por las autoridades sanitarias en algunos casos. Supongamos que la piel empieza a quemarse tras 10 minutos de exposición. Con un protector solar cuyo FP sea 15, una quemadura comparable tardará en producirse un tiempo 15 veces mayor. Un protector solar de FP 30 retardará la quemadura 30 veces más. Pero no hay que hacerse ilusiones. Los laboratorios califican los protectores solares con una densidad de dos miligramos por centímetro cuadrado. Sin embargo, el playista medio se untará quizá con una concentración la mitad que ésa, reduciendo la protección a la mitad. No hay sustancia que detenga por completo la penetración ultravioleta; no existen barreras herméticas contra el sol.

Podemos también prescindir de las afirmaciones acerca de las vitaminas antioxidantes E y C. La oxidación responde sólo de un pequeño porcentaje de los daños por rayos UV. No hay pruebas válidas de que siquiera las vitaminas en forma tópica puedan penetrar en la piel de manera activa. Más preocupa el hecho de que los protectores solares filtran primordialmente las longitudes ultravioletas más cortas, o UVB, y estudios recientes muestran que los rayos ultravioletas de longitud más larga (UVA) pudieran contribuir al envejecimiento de la piel más de lo que se pensaba hasta ahora.

¿Cuál es, pues, el mejor protector solar? Una camisa gruesa. Por ser acumulativos los daños celulares, se aconseja el uso diario de un protector solar, o de pulverizadores con un protector solar, en manos y cara. Una exposición una hora al día durante cinco días podría ser tan amenazadora como todo un día en la playa.




**1. PROTECTORES SOLARES Y ACEITES BRONCEADORES.** La superficie cutánea, merced a sus infinitos picos y cavidades, dispersa una pequeña fracción de los rayos ultravioleta solares. La mayoría de éstos traspasan la epidermis. De los fotones que lo consiguen, absorbe muchos la melanina; el resto, sin embargo, daña al ADN de las células. Ante tamaña agresión, los capilares de la dermis se dilatan, aumentando el contenido sanguíneo y produciendo el enrojecimiento propio de las quemaduras solares. Los protectores solares actúan de filtros que absorben el exceso de rayos UV, disipando su energía. Los aceites bronceadores alisan la superficie, por lo que son menos los rayos que se disipan y más los que penetran, acelerándose el bronceado.

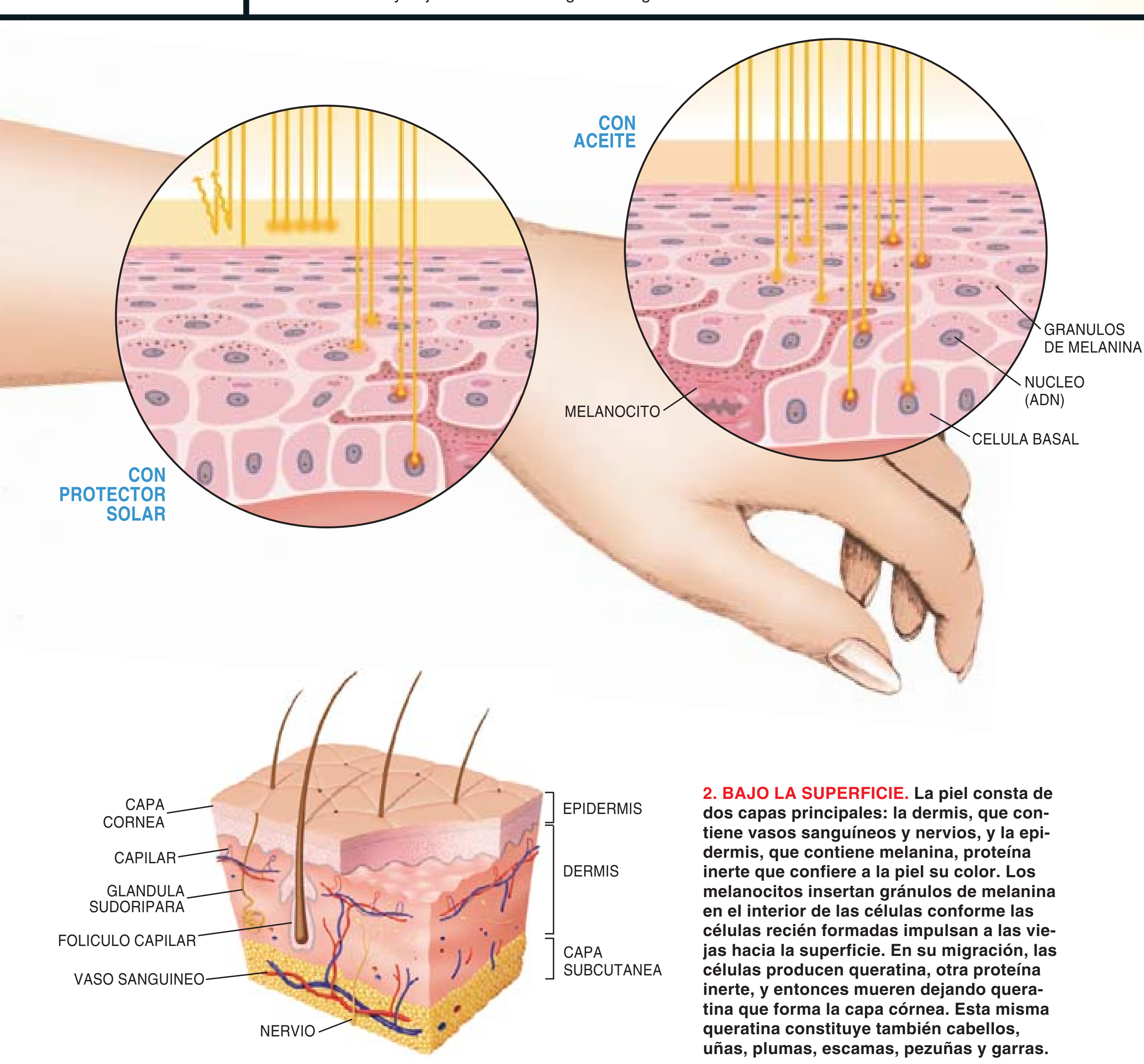
## ¿SABIA USTED QUE...?

➤ **SIN APAB.** Durante decenios los fabricantes de protectores solares usaron ácido para-amino-benzoico (APAB) como ingrediente activo. Pero mancha la ropa y causa reacciones alérgicas en un cinco por ciento de la población; se aduce incluso un posible carácter carcinógeno.

➤ **NUESTRA EPIDERMIS SE MUESTRA.** La melanina, el pigmento de la epidermis que absorbe los rayos ultravioleta, absorbe también la luz visible. Cuanto más eumelanina (pigmento marrón) tiene una persona, más oscura es su piel, del blanco al negro. Los pelirrojos producen mayor cantidad de feomelanina (rojo y amarillo), un absorbente más débil de rayos UV, por lo que tienen más posibilidad de quemarse y menos de broncearse. Los albinos carecen de melanina y bajo el sol sufren un grave riesgo.

➤ **CODO DE CAMIONERO.** El vidrio absorbe eficazmente los rayos UV, por lo que puede mantenerse asido durante horas el volante de un vehículo bajo un sol tórrido sin sufrir quemaduras en manos o brazos. Pero si se baja la ventanilla y se apoya el brazo en el alféizar, tal vez se llegue a destino con una reveladora quemadura que los camioneros conocen bien.

➤ **BRONCEADO EMBOTELLADO.** Los pulverizadores y lociones para broncearse “sin sol” contienen dihidroxiacetona, que se une a los aminoácidos de la capa (muerta) más externa de la piel para producir un bronceado, unas veces más realista que otras. Pero no proporcionan protección anti-UV, por lo que al aire libre siguen necesitando de un protector solar.




**2. BAJO LA SUPERFICIE. La piel consta de dos capas principales: la dermis, que contiene vasos sanguíneos y nervios, y la epidermis, que contiene melanina, proteína inerte que confiere a la piel su color. Los melanocitos insertan gránulos de melanina en el interior de las células conforme las células recién formadas impulsan a las viejas hacia la superficie. En su migración, las células producen queratina, otra proteína inerte, y entonces mueren dejando queratina que forma la capa córnea. Esta misma queratina constituye también cabellos, uñas, plumas, escamas, pezuñas y garras.**

# NEXOS

James Burke

## De arriba abajo

Hace poco di por enésima vez con una sentencia recogida por Sir Isaac Newton, de la que suele abusar precisamente la gente como yo para describir el progreso científico: "Si he visto más lejos… ha sido porque me he alzado a hombros de gigantes". Bueno, es posible que así fuera, pero me gusta pensar que los bufones del montón tienen también su parte.

Valga de ejemplo el caso de un británico excéntrico del siglo XVIII, almirante de la flota inglesa que respondía al nombre de Sir Cloudesley Shovel. Contaba nuestro marino con dos sólidos motivos para merecer un sitio en el panteón de ilustres del progreso. Inventó la peluca que lleva su nombre, un postizo que caía sobre los hombros y del que en su tiempo se decía que semejaba una rebanada de pan doblada sobre la cabeza. Resultaban tan caros la adquisición y el mantenimiento de las pelucas de Shovel que sus ricos propietarios recibían el apelativo de 'pelucones'.

A mi juicio, de mayor fama debería gozar por haber muerto ahogado, pero de una forma tan espectacular, que desencadenó una cascada de acontecimientos que posibilitó la aparición de uno de esos prodigios de la técnica sin los que la vida moderna no sería la misma.

Shovel se ahogó porque, como ya hemos adelantado, era un bufón pomposo. Una fea noche de 1707, mientras regresaba de Gibraltar con su flota, sin saber dónde se encontraba y rodeado por una espesa niebla, prosiguió, sin embargo, con el rumbo elegido. Para su infortunio se hallaba en las puertas de casa (en la costa sudoeste de Inglaterra), así que se estampó contra las rocas. Todo se lo tragó el mar: la flota, dos mil marineros y Shovel.

Lo cierto es que por aquel entonces se perdían así demasiadas naves; se perdían, sin más. Pero las ricas colonias norteamericanas constituían un apetitoso reclamo y los inversores se animaron a financiar medios de transporte transatlántico que no se hundieran. En consecuencia se ofreció un importante premio a quien proporcionara un medio seguro de llegar al destino. Y volver.

En 1764, el relojero John Harrison logró una solución a tiempo. Consideró que el problema de la navegación radicaba en que la Tierra rota un grado de arco, cien kilómetros, en cuatro minutos. Por ello el mediodía (entendido como el momento en que el Sol se encuentra en su punto más alto) ocurre cuatro minutos más tarde cada 100 kilómetros que avanzamos en dirección oeste. Si conocemos qué hora es en un puerto de referencia, podemos deducir, por simple multiplicación, la distancia a partir de la situación del Sol en el cielo.

Harrison, perspicaz, observó que un reloj de péndulo no iba a ser de mucha ayuda en alta mar, en un barco en continuo vaivén. Echó mano de un muelle. En un extremo de su novedoso y sorprendente resorte de acero para el reloj colocó una laminilla de latón, de forma que, aun sometida a condiciones atmosféricas y temperaturas diversas, las sucesivas fases de expansión y contracción no afectaran a la longitud del muelle. El cronómetro de Harrison se retrasaba sólo quince segundos en un viaje de ida y vuelta al Caribe. Puesto que la Tierra rota siete kilómetros en quince segundos, el reloj permitía utilizar el Sol o las estrellas para alcanzar un destino con una precisión de siete kilómetros desde el puerto de origen. Se acabaron los naufragios. O los hubo, pero menos.

El muelle de reloj de Harrison fue tan nuevo y sorprendente gracias al trabajo de Benjamin Huntsman. Había visto éste, relojero también, que algunos cristaleros fabricaban vidrio de calidad muy superior mediante refundición, a altas temperaturas, de los pedazos de botellas rotas. En las fechas en que trabajaba Harrison, el acero, demasiado frágil, resultaba inapropiado para muelles. El truco de Huntsman consistió en encontrar un ingrediente misterioso (que nunca revelaría) que añadía a la arcilla para fabricar crisoles que resistieran temperaturas muy elevadas, condición imprescindible para refundir el acero viejo y obtener un acero nuevo más tenaz. Con el crisol de Huntsman podían alcanzarse esas temperaturas.

El acero de Huntsman era tan duro que, si se afilaba, podía cortar el hierro como si de queso se tratara, el sueño de un forjador ambicioso de nombre John Wilkinson. Fabricó un juego de ataúdes de hierro (regaló varios a sus amigos, reservando tres para sí), levantó una iglesia de hierro, pagó a sus trabajadores con moneda de hierro y dormía guardando una bola de hierro entre los dedos, con la esperanza de que, si le venía en sueños una buena idea, la caída de la bola le despertaría y le permitiría apuntarla y volver a la cama. En 1774 Wilkinson utilizó el metal de Huntsman como cabezal cortante de una nueva máquina de barrenar cilindros. Cortaba el metal con tal limpieza y precisión, que Wilkinson satisfizo la exigencia de James Watt de unos cilindros de pistón con "el espesor de un viejo chelín". Watt utilizaría esos cilindros en su alto horno de va-

por. Bienvenidos a la Revolución Industrial.

Y llegó el francés. Porque la otra cosa que el cachivache de Wilkinson podía hacer era tubos de cañón más delgados y precisos; e intercambiables. Se pasaron de contrabando a Francia (con la que Inglaterra estaba en guerra), como tuberías de hierro. Merced a su ligereza, los nuevos tubos permitieron el desarrollo de la artillería de caballería.

Esto otorgaba valor añadido a la obra de Jean-Baptiste Vaquette de Gribeauval, inspector general de la artillería gala, para quien Wilkinson fabricó las piezas (sus otros clientes fueron los turcos y los norteamericanos, con quienes los ingleses también estaban en guerra). En 1776 Gribeauval inició una profunda reorganización de la artillería francesa: redujo a cuatro los calibres de las armas de fuego y lo normalizó todo, desde la munición hasta el diámetro de las ruedas de los cañones. Gracias a Wilkinson, el ejército francés dispuso de armas que se podían desplazar de un lugar a otro durante la batalla, algo desconocido hasta ese momento. Se daba por supuesto que había que dedicar un día a instalar los cañones y otro día entero a cambiarlos de posición. Los cañones móviles de Gribeauval cambiaron la faz de la guerra, como cambiaría la faz de Europa cuando, en 1792, recogiera la idea un antiguo oficial de artillería y entusiasta de la innovación.

Hacia 1810 Napoleón le había sacado ya mucho partido a sus cañones. Encaramado en el trono imperial, decidió estimular la industria francesa del siglo XIX y creó premios para fomentar los inventos nacionales. Buscaba la independencia militar de Francia, para que la próxima vez que entrara en guerra dispusiese de material propio. Contra pronóstico el primer premio se concedió a Nicolas Appert, de profesión embotellador de champán. Sabedor de que en ningún otro ejército el avituallamiento es de capital importancia, rellenó algunas de sus botellas con verduras y las sumergió en agua hirviendo durante varias horas, matando así gérmenes cuya existencia desconocía. Meses después la marina francesa abrió las primeras botellas en el Caribe y declaró que estaban tan frescas como buenas y con ellas el fin del escorbuto, un auténtico sueño para la logística del ejército.

Algo más tarde, algunos ingleses de paso por París compraron la patente de Appert. Entre ellos había uno cuyo amigo fabricaba latón. Cambiaron el recipiente: botella por lata. Y ése es el origen de la comida enlatada.

Durante el viaje de adquisición de la patente, los compradores británicos toparon con un invento mucho más interesante para la incipiente industria francesa: una máquina que fabricaba papel de forma automática. La pulpa se depositaba sobre una cinta continua vibradora, pasaba después entre unos rodillos cubiertos de fieltro que absorbían el agua y finalmente se colgaba para que se secara. El proceso apenas precisaba de la intervención del hombre. Ya no se necesitaban tantos trabajadores, que de todas maneras andaban por Europa con Napoleón.

Por alguna extraña razón, Francia no supo exprimir la idea. Y los ingleses la incluyeron en su lote de compra de patentes. Hacia 1840 se producía de forma automática todo el papel de empapelar necesario, tan fácil de colocar, para algunos. Artistas y reformadores sociales como William Morris pudieron esbozar diseños rústicos que pronto empezaron a decorar las austeras casas victorianas.

Casas que aún serían más decorosas gracias a otro invento: el lavabo. Después de tres epidemias de cólera (y diez mil muertos) por toda Inglaterra aparecieron cuartos de baño, canalizaciones, retretes y artículos para la higiene. Como resultado de ese proceso de fabricación continua de papel los partidarios de los avances sociales pudieron añadir algo a partir de entonces imprescindible a su higiénico nuevo estilo de vida: el rollo de papel higiénico.

Todo gracias a la conexión Shovel. Abajo los hombros de los gigantes: es la hora de los bufones.

## Biología del desarrollo

### *Madurez*

**COLOR ATLAS OF GENETICS,** por Eberhard Passarge. Georg Thieme Verlag; Stuttgart, 2001. **THE COILED SPRING. HOW LIFE BEGINS,** por Ethan Bier. Cold Spring Harbor Laboratory Press; Nueva York, 2000. **DEVELOPMENTAL BIOLOGY,** por Scott F. Gilbert. Sinauer Associates; Sunderland, 2000.

**THE EVOLUTIONARY BIOLOGY PAPERS OF ELIE METCHNIKOFF.** Edición preparada por Helena Gourko, Donald L. Williamson y Alfred I. Tauber. Kluwer Academic Publishers; Dordrecht, 2000. **DARWINISMUS UND /ALS IDEOLOGIE.** Dirigido por Uwe Hossfeld y Rainer Brömer. VWB; Berlín, 2001.

**DEVELOPMENTAL BIOLOGY IN BRITAIN.** Universidad del País Vasco; Bilbao, 2000. **PERSPECTIVES ON GENETICS. ANECDOTAL, HISTORICAL, AND CRITICAL COMMENTARIES, 1987-1998.** Dirigido por James F. Crow y William F. Dove. The University of Wisconsin Press; Madison, 2000.

Para salvar el hiato de los genes heredados al organismo hecho están los embriones. Animales, hongos y plantas transitan por esa fase cuya investigación científica ha cosechado en los últimos años logros espectaculares. De la abundante bibliografía que descansa sobre los anaqueles hemos escogido tres libros de nivel escalonado: un sumario (*Color Atlas of Genetics*), una aproximación ensayística (*The Coiled Spring*) y un manual universitario (*Developmental Biology*). La obra de Scott F. Gilbert, un clásico, se presenta en esta sexta edición completamente remozada e incluye un capítulo sobre desarrollo vegetal redactado por Susan R. Singer.

El embrión no es una máquina, que sólo opera cuando todas las piezas están engranadas. Aquí el organismo ha de ir constituyéndose a sí mismo desde el estadio unicelular; debe respirar antes de tener pulmones, digerir antes de formar el estómago, fabricar huesos mientras se es gelatina y tender redes de neuronas antes de empezar a pensar. Por eso, las cuestiones que se plantea el biólogo del desarrollo son cuestiones sobre el llegar a ser más que sobre el ser.

Tras la fecundación del óvulo se produce una serie de divisiones mitóticas, al final de cuyo proceso se forma la blástula. Se asiste luego a profundas reordenaciones celulares, la gastrulación. Consta la gástrula de tres capas germinales: el ectodermo, el endodermo y el mesodermo. Las células interactúan entre sí y se acomodan para producir tejidos y órganos. Durante este proceso de organogénesis, ciertas células acometen largas migraciones desde su lugar de origen hasta su destino final.

Declara la premisa central de la biología del desarrollo que todas las células de un organismo dado contienen el mismo material genético. Ahora bien, cada tipo celular —sistema nervioso, músculo o piel— emplea o "expresa" subconjuntos, distintos aunque solapantes, de la información genética ínsita en todas las células. Esta información genética, almacenada en ADN, se copia en cada división celular; por eso la célula hija contiene la misma información genética que su progenitora.

Aunque los genes portan la información requerida para sintetizar las proteínas, cumple a éstas realizar el trabajo real. Un gen puede subdividirse en dos componentes funcionalmente independientes. La primera parte, denominada región codificadora, guarda la información necesaria para la síntesis proteica. La otra parte funcional del gen, llamada región reguladora o región control, es un conmutador de activación e inactivación que determina si la región codificadora del gen sintetizará o no su proteína en un tipo celular dado. En muchos aspectos, el desarrollo viene a ser una cascada de conmutaciones que activan o inactivan otras.

La mutación es una alteración en la secuencia de bases de un gen. En general, el cambio de bases descansa en la región codificadora del gen, aunque hay ejemplos notables de mutaciones que alteran la región reguladora de los genes. De hecho, algunas formas agresivas de cáncer son resultado de mutaciones reguladoras que activan genes implicados en la promoción del desarrollo celular.

La segunda parte de un gen, la región reguladora, determina dónde y cuándo ese gen debe copiarse de ADN en ARN (es decir, transcribirse o expresarse). Algunos genes deben expresarse en todas las células porque sus proteínas cifradas son esenciales para funciones celulares generales (la ATP sintetasa, comprometida en el metabolismo energético). Los genes que intervienen en el desarrollo, sin embargo, frecuentemente se expresan sólo en ciertas regiones del embrión o en tipos de tejido específicos.

El desarrollo puede contemplarse como una secuencia de acontecimientos en los que células inicialmente equivalentes adquieren pautas distintas en la expresión génica. Estas diferencias en la expresión génica definen diferentes potenciales de desarrollo, tales como si una célula formará parte de un músculo o parte del sistema nervioso. Conforme el desarrollo avanza, el potencial de una célula dada se va restringiendo progresivamente hasta que se establece sin ambigüedad su identidad.

Las células adquieren y mantienen distintos potenciales de desarrollo mediante la comunicación intercelular. La comunicación entre células viene mediada por dos tipos de moléculas: señales y receptores. Cuando una célula envía un mensaje, libera una señal que es percibida por receptores presentes en las cercanías. Unas señales están ancladas a la superficie de la célula emisora. Otras señales se se-

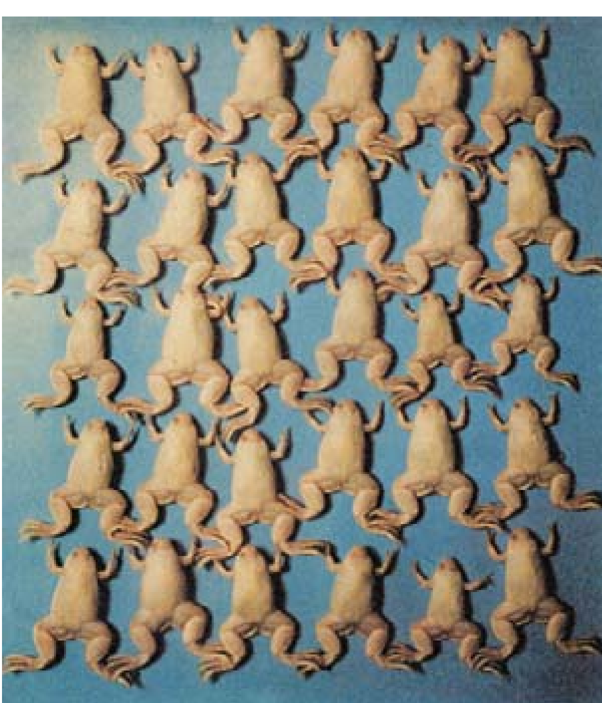
gregan al medio. Un importante tipo de señal difusa es un morfógeno, que, como su nombre indica, se trata de moléculas que determinan la morfología o proporciones de un organismo o estructura.

Uno de los temas más provocadores de la biología contemporánea del desarrollo es el grado notabilísimo de conservación de los mecanismos del desarrollo. Por lo que sabemos, organismos tan dispares como las moscas de la fruta y los humanos utilizan mecanismos virtualmente idénticos para guiar las primeras etapas del desarrollo. Embriones de ambos descansan en conjuntos comunes de genes y mecanismos para subdividir el eje anterior-posterior en unidades segmentadas y el eje dorsal-ventral en tipos básicos.

El desarrollo de *D. melanogaster* a partir del óvulo fecundado en el cuerpo segmentado del organismo adulto tarda nueve días. La cabeza del adulto tiene tres segmentos, el tórax otros tres, y el abdomen ocho segmentos. Presenta también 14 parasegmentos, cada uno de los cuales se corresponde con la última mitad de un segmento y la primera mitad del segmento siguiente. La organización segmentaria se deja ver ya en la larva. Una mutación en el efecto maternal anterior, *bicoid*, conduce al desarrollo de una larva sin cabeza o tórax. Una mutación del gen *nanos* afecta al extremo posterior larvario. Los genes *gap* establecen el patrón básico de la organización segmentaria; sus mutaciones provocan omisiones en la construcción segmentaria de la larva. En el mutante *Krüppel*, faltan todos los segmentos torácicos y los 1-5 abdominales. Los genes *pair-rule* determinan la orientación y destino final de los 14 parasegmentos. Algunas mutaciones afectan a cada segmento. Con *even-skipped*, faltan todos los parasegmentos pares. La mutación del gen *fushi tarazu* conduce a la formación de un número de segmentos menor que los normales. Los genes *segment polarity* determinan la polaridad de cada segmento. Existen más de diez genes *segment polarity*. Los genes *homeotic selector* determinan el destino último de cada segmento. Con el mutante *antennapedia* (*Ant*), la antena anclada normalmente bajo el ojo se sustituye por una pata (pata homeótica).

Una vez terminada la segmentación, los genes *selector* especifican el desarrollo ulterior y el destino final de los segmentos. Constan de tres grandes complejos de genes, el complejo *antennapedia* (*ANT-C*), el complejo bithorax (*BX-C*) y el complejo ultrabithorax (*UBX*). *ANT-C*, que se expresa en los parasegmentos 5 y 6, contiene un segmento de secuencias de ADN peculiar, la homeobox. Su secuencia codifica unos 60 aminoácidos (homeodominio). El homeodominio contiene cuatro dominios de una proteína helicoidal con propiedades enlazadoras de ADN y opera como un factor de transcripción. Los genes homeobox se dan también en los vertebrados.



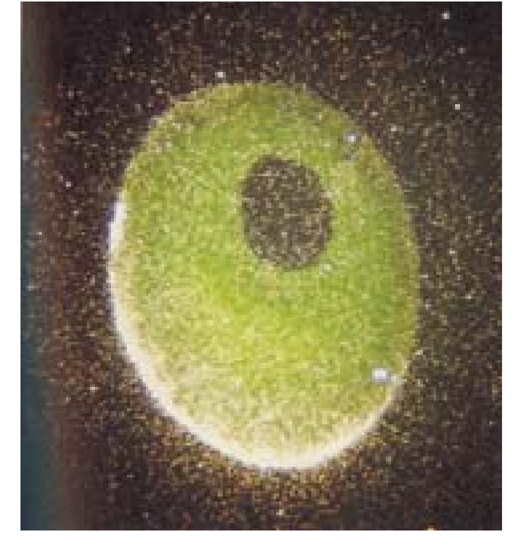


*1. Clon de* Xenopus laevis. *Arriba a la izquierda, hembra donante de huevos enucleados; a su derecha, progenitores albinos de núcleo donante*

Lo mismo que en los animales, en las plantas el plan estructural básico depende de su constitución genética. Pero las plantas se encuentran encajadas en paredes celulares rígidas, que les impiden emigrar. Por eso, los embriones vegetales no pueden emigrar durante la gastrulación; para acometer su reorganización morfológica, deben apoyarse en la división celular orientada y en el desarrollo celular asimétrico. En *Arabidopsis thaliana*, nueve genes con numerosos alelos establecen la organización del embrión. Los genes de la clase A codifican los sépalos; los genes de las clases A y B juntas forman los pétalos; las clases B y C inducen los estambres; y los genes de la clase C se requieren para los carpelos.

¿Cuál ha sido la evolución histórica de la biología del desarrollo? Acostumbran abrir los libros con una líneas de respeto hacia Aristóteles, que vivió en el siglo IV antes de Cristo. Hábil observador, se percató de los dos patrones de división embriogénica, el holoblástico (partición entera de ranas y mamíferos) y el meroblástico (en los pollos, donde una parte del huevo se destina al embrión y la otra a su nutrición). Distinguió entre oviparidad (de aves, ranas y mayoría de invertebrados), viviparidad (de mamíferos euterios) y ovoviviparidad (de ciertos reptiles y tiburones).

En 1651 William Harvey publicaba *Sobre la generación de los organismos*, donde proclamaba que todos los animales se formaban a partir de huevos. *Ex ovo omnia.*



2. *Oocito de* Xenopus laevis

Harvey descubrió el blastodermo del embrión de pollo y llamó la atención sobre las islas de células sanguíneas que preceden a la aparición del corazón. Pero la embriología apenas si trascendió el plano de la especulación hasta la invención del microscopio. En 1672, Marcello Malpighi ilustraba el surco neural (precursor del tubo neural), los somites y la circulación embrionaria. Malpighi protagoniza uno de los grandes debates de la historia de la biología: ¿se crean los órganos *ex novo* en cada generación o parten ya de un esbozo previo?

El final del preformacionismo llegó en el primer tercio del siglo XIX con el avance de las técnicas de tinción y el refinamiento del microscopio. La epigénesis, la embriología en definitiva, adquiere coherencia científica a orillas del Báltico con Christian Pander, Karl Ernst von Baer y Heinrich Rathke. El primero descubrió las tres capas embrionarias. Rathke, en su búsqueda de semejanzas embrionarias entre ranas, salamandras, peces, aves y mamíferos, anotó la existencia de arcos faríngeos vertebrados, que se convierten en el aparato branquial de los peces y que en los mamíferos devienen oídos y mandíbulas.

Por muchas razones se le reconoce a von Baer la paternidad de la embriología moderna. Puso de manifiesto la trascendencia filogenética del notocordio y descubrió el óvulo fecundado de los mamíferos. No sería hoy mal procedimiento didáctico resolver con sus propias armas una famosa duda de 1828: "Tengo dos embriones conservados en alcohol, que me he olvidado de etiquetar, ni he determinado a qué grupo pertenecen. Pueden ser de lagarto, de ave o incluso de mamífero." (Todos los embriones de vertebrados arrancan con una estructura básicamente similar.) De sus trabajos anatómicos extrajo un manojo de principios básicos, las hoy llamadas "leyes de von Baer", según las cuales los rasgos generales aparecen antes que los especiales, éstos se desarrollan a partir de aquéllos y el embrión de una especie superior no recorre ningún estadio de un adulto de especie inferior, sino que sus semejanzas se ciñen al embrión de ésta.

Con el establecimiento por Theodor Schwann de la teoría celular y el enfoque histológico subsiguiente impuesto a las capas embrionarias, la disciplina atraviesa una etapa de excitación. En 1842 Rudolf Albert von Koelliker ponía de manifiesto las analogías entre el desarrollo de los artrópodos y el de los vertebrados.

Tras leer el sumario que Johannes Müller había hecho de las leyes de von Baer, Darwin escribió que las semejanzas embrionarias apuntalaban la conexión genética entre diferentes grupos animales. Sobre la relación del darwinismo con la embriología se explaya con solidez la introducción a *The Evolutionary Biology Papers of Elie Metchnikoff*, compilación de los escritos de este autor ruso redactados en el último tercio del siglo XIX. También le dedica un capítulo *Darwinismus und /als Ideologie*.

Elie Metchnikoff (1845-1916) ocupa un puesto destacado en la historia de la inmunología; por sus contribuciones en ese campo ganó el premio Nobel en 1907. De menor difusión han gozado sus trabajos embriológicos, pese a que su teoría de la fagocitosis para explicar la inmunidad derivaba de su investigación temprana en biología comparada del desarrollo. Confiesa en "La lucha por la existencia entre las partes de los organismos animales", de 1892, que la fagocitosis se había construido sobre la teoría de la selección de Darwin.

Con su compatriota, Alexander O. Kovalevsky inicia el estudio de las capas germinales de embriones invertebrados. Kovalevsky defendía que la mitad de la blástula de *Amphioxus* se hundía en la otra mitad (invaginación), formando la gástrula. Al poco, la superficie del embrión se cubría de cilios, se rompía la membrana y se liberaba la gástrula para comenzar la fase de natación libre. Para Metchnikoff, sin embargo, el patrón de formación de capas embrionarias era otro; la segunda capa (el endodermo) no se constituía por invaginación (del ectodermo), sino por introgresión-migración de varias células flageladas, desde un polo de la pared de la blástula hasta la cavidad central. Estas células ameboides eran fagocíticas. Metchnikoff denominó a ese estadio *parenchymella*, un organismo primitivo que más tarde opondría a la hipotética *gastraea* de Haeckel.

Jane Maienschein recorre, a grandes zancadas, en el libro sobre la apropiación ideológica (social y política) de las tesis darwinistas la historia de las relaciones entre genética y desarrollo desde Thomas Hunt Morgan. Partidario primero del vínculo entre ambos, redefinió luego la genética como la ciencia que estudia la transmisión de los caracteres, en oposición a la embriología, que se ocuparía de la expresión de los caracteres. A lo largo de la última década, sin embargo, las técnicas de la biología molecular han propiciado un acercamiento entre la embriología y la genética. Recuerda la autora que la embriología quedó al margen de la aportación de la zoología, botánica, paleontología y genética a la "teoría sintética de la evolución", para realzar su actual convergencia en una nueva síntesis "Evo-Devo" (Evolution-Development).

Los pasos hacia esa convergencia se detallan en *Developmental Biology in Britain* y *Perspectives on Genetics. Anecdotal, Historical, and Critical Commentaries*. El primero se centra en Inglaterra, aunque mirando siempre el contexto internacional. El segundo recoge las "Perspectives" aparecidas en *Genetics*, recuadros puntales que facilitan la comprensión de la evolución de la genética del desarrollo.

Desde comienzos del siglo XX veníase buscando el agente desen-

## Caulerpa

**KILLER ALGAE**, por Alexandre Meinesz. University of Chicago Press; Chicago, 1999.

La llegada e instalación de una especie foránea puede provocar cambios muy profundos en las comunidades biológicas de una zona. Esas invasiones biológicas están consideradas como uno de los mayores peligros para la conservación de la biodiversidad del planeta, rivalizando con la pérdida de hábitat o la sobreexplotación. La elevada movilidad de la especie humana y el gran trasiego de mercancías por todo el mundo ha acelerado enormemente la introducción involuntaria de especies en lugares alejados de sus zonas de origen. La colonización de ciertas costas mediterráneas por el alga verde *Caulerpa taxifolia* es un claro ejemplo de invasión biológica, puesto que ha desplazado en pocos años la flora habitual de los fondos colonizados hasta convertirlos en praderas casi monoespecíficas de esta especie.

El libro de Alexandre Meinesz trata de la historia de la introducción de esta especie en el Mediterráneo, sin duda la mejor documentada de cuantas invasiones ha habido en el medio marino. Publicado en 1997 bajo el nombre de "Le roman noir de l'algue tueuse" (Bélin), su traducción al inglés por el renombrado ecólogo Daniel Simberloff y la insólita aparición de *Caulerpa taxifolia* en San Diego (California) en verano del 2000 han relanzado el libro a un primer plano de actualidad.

Originaria de los mares tropicales y subtropicales de todo el mundo, la primera mancha de *Caulerpa taxifolia* observada en el Mediterráneo data de 1984 cuando cubría un escaso metro cuadrado en los fondos del litoral de Mónaco. Su origen más verosímil: el famoso Museo Oceanográfico de este pequeño Principado, el cual albergaba esta alga en sus acuarios de peces tropicales. En 1990 el alga aparece en diversas localidades de las costas francesas y Alexandre Meinesz, profesor de la Universidad de Niza y experto en algas del género *Caulerpa*, da la voz de alarma. Entre 1991 y 1992 la distribución de *Caulerpa taxifolia* se expande a las costas italianas, los Pirineos Orientales y las islas Baleares (Mallorca). A finales de 1994 se conoce de casi 40 localidades mediterráneas, habiéndose extendido hasta Sicilia y Croacia, y el área ocupada asciende a unas 15.000 hectáreas. En la actualidad la especie no ha sufrido ninguna regresión en las zonas colonizadas, se ha localizado también en el norte de Africa y el número de localidades supera el centenar. Las principales vías de dispersión han sido las redes de los pescadores y las anclas de los veleros y yates de recreo, pues la reproducción sexual no ha sido observada nunca en plantas mediterráneas.

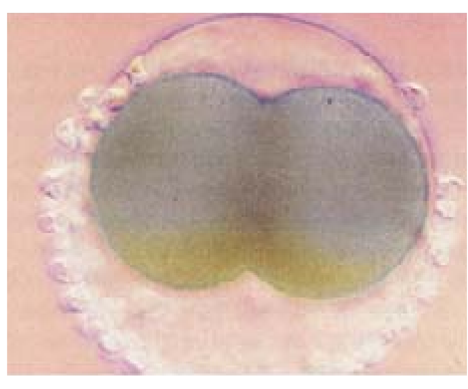
¿Cómo es posible que una especie inicialmente tan localizada, sin capacidad de reproducirse sexualmente, y con un equipo de biólogos especialistas que alertan del peligro de su posible expansión, no haya sido atajada a tiempo? Intuyo que esta es la razón que ha movido a Alexandre Meinesz a escribir "Killer algae". En este libro da a conocer los múltiples problemas que ha habido para encontrar financiación, la oposición frontal de los investigadores y gestores del Museo Oceanográfico de Mónaco a las tesis defendidas por Meinesz, el papel de la prensa sensacionalista en complicar las cosas, y, ante todo, la despreocupación de las administraciones francesas a tomar cartas en el asunto. —ENRIC BALLESTEROS

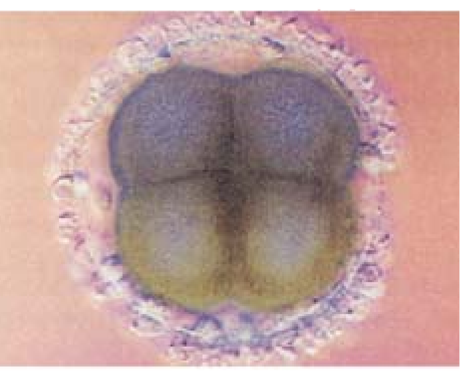
cadenante de la diferenciación. No se encontró hasta 1924, cuando Hans Spemann y su ayudante Hilde Mangold descubrieron que el labio dorsal del blastoporo (en el estadio de gástrula) transformaba la región circundante, actuando como organizador del desarrollo. Se determinó, además, que cada fase del desarrollo era necesaria para dirigir la siguiente.

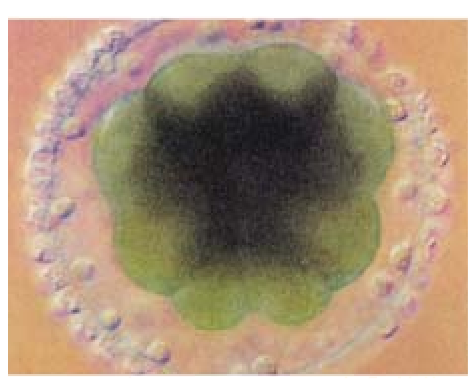
La ejecución experimental de Mangold resultó de una elegancia extraordinaria. Trasplantó un fragmento de futuro tejido dorsal procedente de un embrión donante en la posición ventral de un embrión huésped. (La región dorsal de los embriones vertebrados da origen al cerebro y la médula espinal, mientras que las regiones ventrales formarán la piel, músculo y tejido sanguíneo.) Mangold obtuvo un renacuajo monstruoso de dos cabezas. Puesto que las células procedían de dos embriones diferentes, podía determinarse si el segundo eje neural (cerebro y médula espinal) del embrión de renacuajo de dos cabezas estaba compuesto por células del donante o del huésped. Se demostró que el segundo eje neural se hallaba enteramente formado por células procedentes del huésped. Si las células del donante no contribuían al segundo eje neural, podía inferirse que actuaban organizando las células de huésped vecinas e induciéndolas a cambiar el curso del desarrollo (generación de estructuras nerviosas y no epidérmicas).

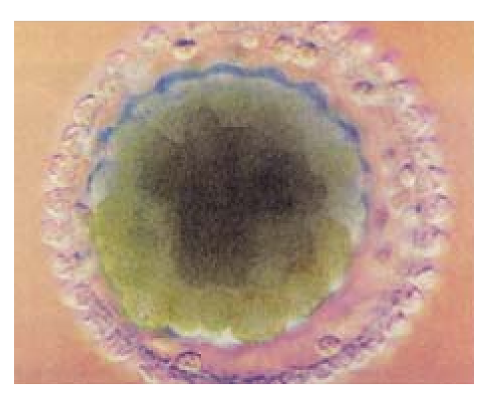
Las dos figuras capitales de la embriología inglesa antes de la segunda guerra mundial fueron Joseph Needham y Conrad H. Waddington. Needham trabajó cierto tiempo en la búsqueda del organizador de Spemann. Antes había publicado la primera *Embriología química*, donde abordaba las bases moleculares del desarrollo. Más tenaz, Waddington centró su atención en el "organizador" de los embriones amniotas. Mostró que el nódulo de Hensen (el extremo anterior de la línea primitiva) poseía muchas propiedades en común con el labio dorsal del blastoporo. En las aves, dedujo, la línea primitiva es un organizador funcional, aunque no el único.

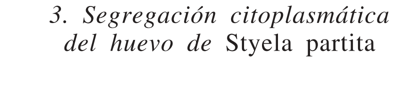
Desde comienzos del siglo XX los animales preferidos en los laboratorios eran los urodelos. Spemann experimentaba con *Triturus*. Con tritones trabajó también Needham. Pero desde la segunda guerra empezó a difundirse el uso de *Xenopus laevis*; éste es hoy, con *Drosophila*, el ratón, el pollo, *Caenorhabditis elegans* y el pez cebra, el organismo "modelo" más socorrido. *X. laevis* es endémica de Africa meridional y central. Una coincidencia, la demanda generalizada de tests de embarazo en las avanzadas Europa y América, facilitó su entrada en los laboratorios, hasta hacerse imprescindible por su manipulación, resistencia excepcional a las enfermedades, ciclo biológico corto, cuan-











*3. Segregación citoplasmática del huevo de* Styela partita

tiosa progenie y óptima respuesta reproductora a los preparados comerciales de hormona.

*Caenorhabditis elegans* es un nemátodo transparente, milimétrico, con un ciclo biológico de unos tres días. Sólo existen machos o hermafroditas. Los hermafroditas producen óvulos y espermatozoides y pueden reproducirse por autofecundación. La popularización de *C. elegans* se debe a Sydney Brenner, quien, mediados los sesenta, se propuso estudiar su escueto sistema nervioso, de unas trescientas neuronas. Dada la simplicidad del gusano, a partir de la reconstrucción de micrografías electrónicas podía definirse toda la circuitería nerviosa, siguiendo el desarrollo biológico de embriones se podía deducir el linaje celular del animal entero y por genética de mutantes identificar sus vías metabólicas.

Hacía poco que Ernst Hadorn, Donald Poulson y Edward Lewis habían comenzado a utilizar mutantes de *Drosophila* para identificar genes clave implicados en el desarrollo y caracterizar los fenotipos resultantes. Esos estudios demostraron el valor de los mutantes como material de partida para diseccionar procesos complejos del desarrollo. Hadorn puso de relieve, además, que en la embriogénesis de *Drosophila* se establecen dos vías distintas de desarrollo, una para las estructuras larvarias y otra para las estructuras imaginales (adultas).

En las postrimerías de los años sesenta John Gurdon daba un paso de gigante con otro experimento magnífico, recogido en los manuales. Confirmábase en él la hipótesis de que todos los genes persistían en las células somáticas y que el desarrollo era, por consiguiente, un asunto de regulación génica diferencial. Introdujo una pipeta en una célula dérmica de la pata de una rana adulta y absorbió el núcleo. Extrajo también el núcleo de un óvulo fecundado; lo eliminó. El huevo "enucleado" carecía de la información genética pero conservaba todos los demás ingredientes de óvulo fecundado. Inyectó luego el núcleo de la célula de la dermis en el huevo enucleado. Así empezó la clonación. El huevo híbrido llegó a renacuajo.

Con Hadorn había trabajado Antonio García-Bellido. Cuenta en *Perspectives* la historia por él protagonizada en 1972 sobre la mutación *engrailed.* Para el lector español es una recordación indirecta del nacimiento de la biología del desarrollo en nuestro país. El análisis genético del desarrollo de *engrailed* y el subsiguiente, cuatro años más, del complejo *bithorax,* constituyeron la base para la noción de genes selectores.

El de 1984 fue un año histórico. Un siglo justo antes William Bateson acuñaba el término homeosis para definir una clase de variaciones biológicas en las cuales un elemento de una disposición repetidamente segmentaria de estructuras del organismo se transformaba en la identidad de otro. Tras el redescubrimiento de las leyes de Mendel, salieron a la luz ejemplos de homeosis que se daban en los órganos florales y en los esqueletos animales. No tardó mucho en observarse que la mosca de la fruta tenía muchos genes "homeóticos" (*bithorax, aristapedia* y *proboscipedia*), algunos de los cuales se ofrecían agrupados en el tercer cromosoma. Estos estudios genéticos culminaron en los análisis sistemáticos de Lewis y Kaufman, quienes aportaron definiciones preliminares de los muchos genes homeóticos de los complejos *Bithorax* y *Antennapedia*. Pero en 1984 un repentino aluvión de trabajos (McGinnis, Scott y Weiner, Laughon y Scott, Shepherd, Carrasco y Levin) introdujeron el *homeobox* en genética del desarrollo y esbozaron sus líneas maestras. Las secuencias homeobox se caracterizaban por su persistencia ("conservación") en otros animales, mamíferos incluidos; se postuló que codificaban los homeodominios de enlace de ADN por su semejanza con las proteínas reguladoras de la transcripción.

Con el establecimiento de la colinearidad de los genes *Hox* en ratones y en *Drosophila*, se demostraba indirectamente la monofilia del reino animal. Así surgió la poderosa corriente "Evodevo", en que nos hallamos. Un hito importante del Evodevo fue el análisis de genes del desarrollo en *Amphioxus* por Peter Holland. Era a principios de los noventa. De su estudio se infería que muchos genes del desarrollo de embriones vertebrados se dan agrupados en familias.

—LUIS ALONSO